



**Facultad  
de  
Ciencias**

# **Simulación y experimentos de captura de luz para espectroscopía láser**

Simulation and light capture experiments for  
laser spectroscopy

Trabajo de Fin de Grado  
para acceder al

**GRADO EN FÍSICA**

**Autor:** María Gabriela Fernández Manteca

**Director:** Adolfo Cobo García

**Septiembre - 2020**



*“El que ha desplazado la montaña es el que  
comenzó por quitar las pequeñas piedras.”*

Proverbio chino



# Agradecimientos

Lo primero de todo, agradecer a Adolfo Cobo su amabilidad, su disposición y su constante refuerzo positivo para que este trabajo salga adelante, ¡gracias!

A todos los que creyeron en mí desde el primer momento, a todos, gracias. Han sido cuatro años intensos, pero gracias a vosotros siempre seguí con fuerza y ánimo.

A Diego, por el cariño y la paciencia.

A los Javis, que me han animado a seguir por este camino y siempre han tenido tiempo de ayudarme con mis dudas y darme consejos sobre mi futuro.

A mis amigos, a los de Santander y a los de Selaya. A la de siempre, Teja, mi fiel compañera de vida desde que tengo memoria. A los que se cruzaron por mi camino estos cuatro últimos años, en especial a Raúl Coterillo, por ser tan generoso siempre que lo he necesitado y ser mi apoyo esencial en Italia durante mi Erasmus.

También me gustaría mencionar que mi paso por la universidad no habría sido lo mismo sin la cafetería de ciencias, donde durante cuatro años me he cruzado con mucha gente, y todos nos hemos hecho apoyo desahogando nuestras penas universitarias, pero siempre entre risas, café y cartas. Gracias a todos ellos por hacerme tan amenos los días, las comidas y las tardes en la universidad.

Finalmente, y no menos importante, agradecer a mi hermano Pedro su apoyo, sus consejos y ser mi referente en la vida. A mis padres, que sobra decirlo, pero sin ellos esto no habría sido posible, ¡gracias!



# Resumen

La espectroscopía de ruptura inducida por láser (LIBS) es un tipo de espectroscopía de emisión atómica que permite obtener información sobre la composición de materiales o la presencia de determinadas sustancias mediante el análisis de la luz del plasma generado al hacer incidir un láser multipulso de alta energía sobre la superficie de un material en cualquier estado de agregación. La captura de luz se puede realizar a través de varios métodos: fibra óptica, imagen por lente, telescopio remoto... Estas formas de captura cuentan con numerosas ventajas e inconvenientes, siendo los principales problemas la pérdida de luz y las fluctuaciones del plasma con el tiempo, lo cual genera resultados diferentes para cada medición. En este trabajo se van a intentar solventar dichos problemas buscando un sistema de lentes que forme imágenes homogéneas en el tiempo y que capte la mayor cantidad de luz posible. Para ello, se utilizará el software de diseño óptico OpticStudio de Zemax, con el que se realizarán las simulaciones del comportamiento de la emisión del plasma a su paso por los diferentes sistemas ópticos, y, posteriormente, se comprobará la eficacia de dichas simulaciones experimentalmente.

**Palabras clave:** LIBS, plasma, iluminación Köhler, fibra óptica, Zemax.

# Abstract

Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) is a type of atomic emission spectroscopy that allows to obtain information on the composition of materials or the presence of certain substances by analyzing the light from the plasma generated when a high-energy multipulse laser strikes on the surface of a material in any state of aggregation. Light capture can be done through various methods: fiber optics, lens imaging, remote telescope... These forms of capture have numerous advantages and disadvantages, the main problems being the loss of light and plasma fluctuations over time, which produces different results for each measurement. The objective of this dissertation is to solve these problems by looking for a lens system that forms homogeneous images over time and captures as much light as possible. For this purpose, the OpticStudio software by Zemax will be used to simulate the behavior of the plasma emission as it passes through the different optical systems, and, subsequently, the effectiveness of these simulations will be experimentally verified.

**Keywords:** LIBS, plasma, Köhler illumination, optical fiber, Zemax.





# Contenidos

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación del trabajo . . . . .	2
1.2. Objetivos y estructura del trabajo . . . . .	2
<b>2. Antecedentes teóricos</b>	<b>3</b>
2.1. Espectroscopía de plasma inducido por láser (LIBS) . . . . .	3
2.2. Iluminación Köhler . . . . .	5
2.3. El software OpticStudio <sup>®</sup> de Zemax . . . . .	6
<b>3. Equipo experimental</b>	<b>9</b>
<b>4. Resultados y análisis</b>	<b>15</b>
4.1. Simulaciones . . . . .	15
4.2. Resultados experimentales . . . . .	21
4.2.1. Medidas utilizando un LED . . . . .	21
4.2.2. Medidas de espectroscopía LIBS . . . . .	27
<b>5. Otros métodos de captura de luz</b>	<b>31</b>
5.1. Captura cercana: Esfera integradora . . . . .	31
5.2. Captura remota: Telescopios . . . . .	33
<b>6. Consideraciones finales y trabajo futuro</b>	<b>35</b>
6.1. Conclusiones . . . . .	35
6.2. Trabajo futuro . . . . .	36
<b>A. Identificación de aberraciones en diagramas ray fan</b>	<b>37</b>
<b>B. Datos de las simulaciones</b>	<b>39</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>43</b>

# Capítulo 1

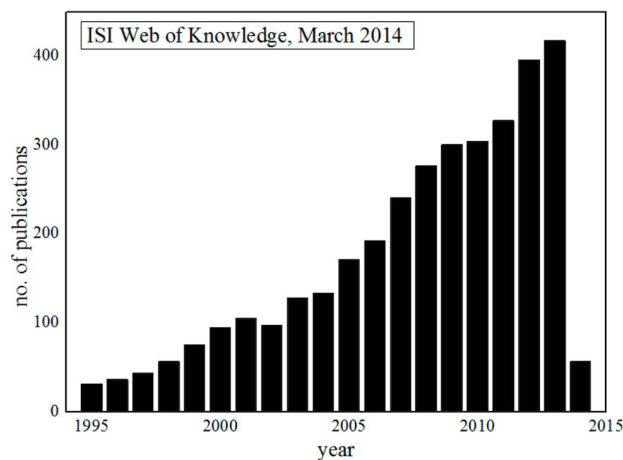
## Introducción

La fotónica es la rama de la ciencia que estudia el comportamiento de la luz, desde su generación hasta su detección. Existen multitud de formas de detección de luz, pero este trabajo se centra solamente en la técnica espectroscópica LIBS, que permite determinar la composición de los materiales estudiados mediante el análisis de la luz del plasma generado, concretamente a través de las transiciones atómicas producidas al incidir con un láser de alta energía sobre una muestra.

Las primeras publicaciones utilizando LIBS se remontan a los años 60, con la entonces reciente invención del láser. Desde entonces, se ha ido desarrollando con el tiempo y ha abierto camino hacia multitud de aplicaciones presentes en nuestro día a día.

Existe un aumento significativo en la utilización de LIBS a partir del año 2000. Los principales motivos fueron la posibilidad de utilizar un equipo portátil, compacto y accesible a lugares de difícil acceso, junto con el desarrollo de espectrómetros de alta resolución de banda ancha, lo cual significó que podrían distinguirse elementos químicos incluso si se encontrasen en baja concentración.

En cuanto a las utilidades de LIBS, destacan las aplicaciones biomédicas, como [1], para la identificación de bacterias, o su aplicación en misiones espaciales, como en [2] y [3], que estudian la composición de la superficie de Marte. No obstante, LIBS se puede utilizar para muchísimas otras áreas, como en aplicaciones oceanográficas [4], geoquímicas [5], farmacéuticas [6] o medioambientales [7].



**Figura 1.1:** Artículos publicados sobre LIBS en los últimos años. Imagen de [8].

## 1.1 Motivación del trabajo

Cuando se hacen medidas de espectroscopía LIBS utilizando energías láser lo suficientemente elevadas, se origina una pluma de plasma, cuya emisión es recogida por un sistema colector y analizada debidamente para obtener su correspondiente espectro de emisión. El plasma generado es inhomogéneo espacial y temporalmente en todas sus propiedades, siendo las más importantes la temperatura electrónica y la densidad electrónica. A pesar de que la mayor parte de estas variabilidades en el plasma son inevitables y dependen de las características del plasma en cada disparo láser, existen otras fuentes de variabilidad que se pueden corregir, y una de ellas está relacionada con la óptica de captura. Esta es la motivación principal del presente trabajo, crear un sistema de lentes que permita obtener espectros LIBS homogéneos para cada pulso láser disparado sobre la misma posición de la muestra, y, además, que permita captar la mayor cantidad de luz posible.

Otra de las motivaciones esenciales de este trabajo es la oportunidad de aprender a utilizar el software OpticStudio de Zemax para simular y hacer un análisis del trazado de rayos a su paso por los sistemas de lentes que se van a probar en el laboratorio.

## 1.2 Objetivos y estructura del trabajo

Habiendo cubierto los aspectos y las motivaciones más relevantes detrás de este trabajo, se plantean los objetivos previos a la realización del mismo.

- Familiarizarse con el software Zemax, la técnica LIBS y la utilización de los elementos ópticos que esta implica.
- Construir un diseño de lentes en Zemax que cumpla todos los requisitos necesarios para poder probarlo en el laboratorio.
- Hacer que todos los diseños produzcan como imagen una mancha de iluminación homogénea y se introduzca en una fibra óptica la mayor cantidad de luz posible.
- Trasladar las simulaciones al laboratorio y realizar un análisis de los resultados experimentales obtenidos.
- Buscar otras formas de captura de luz utilizando LIBS.

Estos objetivos serán contemplados a lo largo del trabajo, siguiendo la siguiente estructura:

En el **Capítulo 2** se realiza una descripción teórica de los conceptos principales que engloba el trabajo: la técnica LIBS, la iluminación Köhler y las principales características del software OpticStudio de Zemax. En el **Capítulo 3** se describe el equipo experimental utilizado en el laboratorio. En el **Capítulo 4** se desarrollan los diseños realizados con Zemax, junto a su correspondiente análisis, y se ofrece la descripción y análisis del trabajo realizado en el laboratorio. En el **Capítulo 5** se exponen otras formas de captura de luz que no implican un diseño de lentes. Finalmente, en el **Capítulo 6** se resumen las principales conclusiones de este proyecto, junto con algunas observaciones finales y sugerencias para posibles mejoras y futuras vías de investigación.

# Capítulo 2

## Antecedentes teóricos

En este capítulo se describen los principales fundamentos teóricos necesarios para comprender el presente trabajo. En primer lugar, se ofrece una descripción de la técnica LIBS, en la cual se fundamenta todo el proyecto. Posteriormente, se dedica una sección a la iluminación Köhler, que se utiliza como referencia para realizar todas las simulaciones. Finalmente, se explican brevemente las funciones del software Zemax que se consideran esenciales para poder comprender el análisis realizado en el Capítulo 4.

### 2.1 Espectroscopía de plasma inducido por láser (LIBS)

En esta sección se exponen las características fundamentales de la técnica LIBS. Para obtener información más extensa y detallada consultar las referencias [9] y [10].

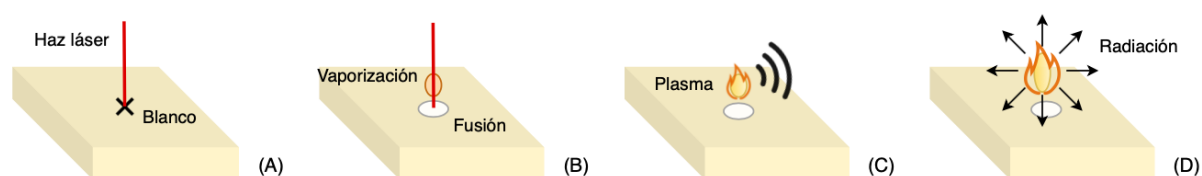
La espectroscopía de plasma inducido por láser (LIBS) es un tipo de espectroscopía de emisión atómica que utiliza como fuente de excitación un láser pulsado. Se trata de una técnica cada vez más utilizada debido a que cuenta con las siguientes ventajas:

- Se aplica a todo tipo de materiales: conductores, no conductores y en cualquier estado de agregación.
- La muestra no requiere apenas preparación.
- Las medidas se pueden tomar a distancia, sin tener ningún contacto físico con el material.
- Se puede hacer LIBS con muy poca cantidad de muestra (del orden de nanogramos).
- El equipo experimental es simple y compacto, permitiendo realizar un análisis rápido, in situ y multielemental.

La desventaja principal de esta técnica es la falta de homogeneización del plasma generado debido a la variación de la energía emitida por el pulso de radiación láser, lo cual se traduce en problemas cuando realiza el análisis. Por otra parte, existen efectos de interferencia que también pueden dificultar la lectura de los resultados, como la autoabsorción, el solapamiento de líneas espectrales o las interferencias químicas. Otro factor a tener en cuenta para hacer espectroscopía LIBS son las propiedades de la muestra, como la reflectividad, la densidad, el calor específico o el punto de ebullición, que también pueden influir notablemente en los resultados. Finalmente, la contaminación de la superficie

también puede suponer un problema, que se soluciona fácilmente aplicando unos pocos pulsos láser sobre el mismo punto hasta que quede completamente limpio.

Al irradiar una muestra con un haz láser se produce un enorme calentamiento de la superficie de incidencia debido a que el material absorbe la energía láser para fundir y vaporizar el blanco una vez que se alcanza la temperatura de vaporización. Si el flujo de la radiación es bajo, la superficie afectada del material se calienta al absorber la energía de los fotones del rayo y sublima o se evapora. Por el contrario, si el flujo de radiación es muy intenso, se forma el plasma. Como resultado de la irradiación, el material es erosionado y se originan cráteres sobre su superficie. Además, tras la incidencia del láser aumentan los efectos fototérmicos, lo cual se traduce en cráteres de diámetro superior al del haz enfocado. En la Figura 2.1 se muestra un esquema del proceso de formación del plasma en espectroscopía LIBS.



**Figura 2.1:** Proceso de formación del plasma en espectroscopía LIBS. (A) Irradiación del haz láser sobre el blanco de la muestra. (B) Fundición y vaporización del blanco. (C) Formación del plasma y consecuente emisión de ondas de choque debido a la expansión del vapor a alta presión. (D) Emisión de la radiación procedente del plasma.

Se denomina plasma al cuarto estado de agregación de la materia. Se trata de una agrupación de átomos, iones y electrones libres, en su conjunto eléctricamente neutro. Los plasmas en LIBS se forman cuando los electrones libres del gas originado absorben la luz del láser incidente. En LIBS, el plasma se encuentra débilmente ionizado, y parte de sus partículas se encuentran cargadas eléctricamente, adquiriendo propiedades de los conductores. Además, alcanza temperaturas superiores a 150000 K, provocando la evaporación del material ablacionado.

La evolución del plasma consta de tres etapas:

- Ruptura de los enlaces moleculares del material y comienzo de la formación del plasma. La emisión del plasma es un intenso continuo debido a que la densidad de electrones es muy elevada.
- Expansión, fase en la cual aparecen las líneas de emisión. La temperatura y la densidad de electrones disminuye, y las líneas de emisión pierden ensanchamiento. Es el momento óptimo para realizar las mediciones. Además, la alta presión del proceso produce ondas de choque en la atmósfera que se propagan a velocidades supersónicas.
- Enfriamiento y decaimiento del plasma.

Cabe destacar que el plasma puede producirse de dos formas: tras una ruptura en cascada o mediante ionización multifotónica. Longitudes de onda cortas (UV) producen ionización multifotónica, mientras que longitudes de onda más largas (IR) favorecen la ruptura en cascada.

En lo referido al láser, para hacer espectroscopía LIBS se utiliza un láser pulsado Nd:YAG con cavidad resonante Q-switch, que consiste en colocar un atenuador variable dentro de la cavidad óptica. El régimen Q-switch puede ser: activo si se necesita aplicar una diferencia de potencial externa, o pasivo si no es necesario aplicar una estimulación externa. Gracias a este régimen es posible emitir varios pulsos cortos, de hasta femtosegundos. No obstante, también se pueden hacer medidas LIBS sin necesidad de utilizar el régimen Q-switch, bastaría con emitir pulsos únicos cuya energía suministrada al material por unidad de área, o fluencia láser, superase un cierto valor umbral a partir del cual se forma el plasma.

El motivo por el cual se utilizan varios pulsos seguidos es que en el primer pulso la mayor parte de la energía láser incidente es absorbida por la pluma, y es necesario un segundo pulso para excitar aún más el plasma, aumentando así la intensidad de emisión de los componentes químicos de la muestra.

En el Capítulo 3 se explica de forma más extensa el equipo experimental necesario para realizar espectroscopía LIBS. Se resume en que el láser pulsado incide sobre la muestra, produciendo un enorme aumento de la temperatura, lo cual provoca la fundición y vaporación del material, dando lugar a una nube cargada de iones, o pluma de plasma. La luz generada por el plasma se recoge mediante un sistema de colección, que en este trabajo se va a fundamentar en un sistema de lentes, hasta una fibra óptica, que dirige la señal hacia un espectrómetro para transformar la señal luminosa en eléctrica, obteniendo así, con ayuda de un software informático, el espectro de emisión característico de los átomos que componen la muestra.

## 2.2 Iluminación Köhler

Cuando se hacen medidas de espectroscopía LIBS, el plasma formado en cada disparo láser puede variar en gran medida y no ser homogéneo, ya que la generación del plasma es un fenómeno fuertemente no lineal, con interacción compleja de fenómenos electromagnéticos, térmicos y de transporte, y enormes gradientes en todas sus magnitudes [12]. Esta variación puede volverse problemática cuando se obtienen imágenes en haces de fibra conectados a múltiples canales de un espectrómetro. Una señal heterogénea conduce a una imagen espacialmente dependiente del haz de fibras, lo que provocaría lecturas inconsistentes e inestabilidad en la medida. La iluminación Köhler se utiliza para crear una iluminación uniforme, independientemente de la homogeneidad de la fuente, mejorando así la estabilidad de la captura.

Si la emisión de luz es homogénea, el extremo desnudo de una fibra óptica o una lente colectora seguida de una fibra óptica puede recoger la luz e introducirla en cada fibra del haz por igual. Esto es lo que normalmente se considera en las configuraciones LIBS. No obstante, el último enfoque se produce según los principios de la formación de imágenes, por lo que cualquier variación espacial en la fuente se refleja en el haz de fibra óptica. Si la fuente no es espacialmente homogénea, cada canal recibirá luz de una parte específica del plasma, lo cual provocará variaciones en la cantidad de luz recogida entre los canales y supondrá una importante inestabilidad.

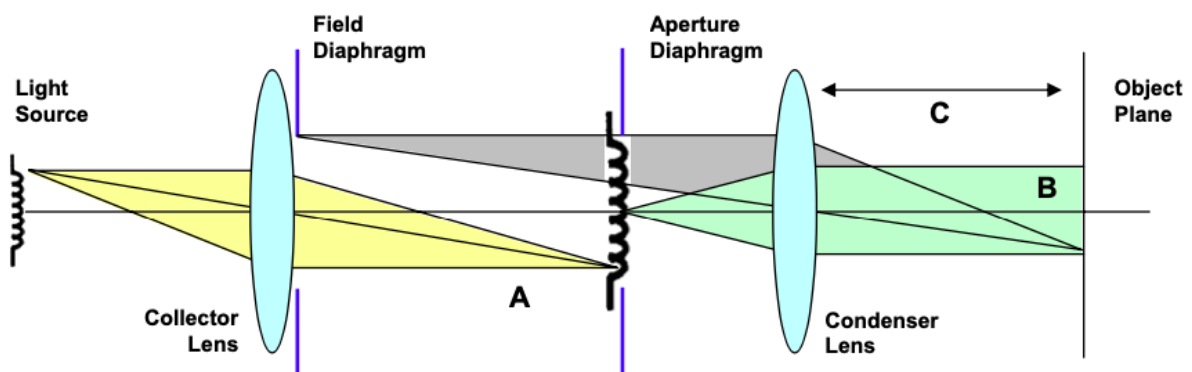
La iluminación de Köhler fue inventada en 1983 por August Köhler como un método para iluminar uniformemente muestras en un microscopio óptico. Para aliviar el problema de

obtener una imagen de la fuente de luz en la muestra, propuso colocar la fuente en el plano focal del objeto de una **lente condensadora**, permitiendo que la muestra sea iluminada uniformemente por rayos colimados. Este diseño presenta un problema: el calor de la fuente afecta a la muestra. Se puede comparar esta situación con la proyección de residuos de plasma en la óptica si estuviera demasiado cerca. Para alejar la fuente de luz de la muestra, introdujo una **lente colectora**, que representaría a la fuente en el plano focal objeto de la lente condensadora como una fuente virtual.

La iluminación de Köhler fue un hito importante en la historia de la microscopía óptica y se usa ampliamente en la actualidad. Por ejemplo, es el principio básico que se encuentra detrás de la homogeneización de los rayos láser.

En la Figura 2.2 se muestra un esquema del principio de iluminación Köhler en el que se utiliza una bombilla para iluminar el plano objeto del microscopio [13]. Consta de dos lentes y dos diafragmas, que permiten ajustar el tamaño y la apertura numérica de la iluminación del objeto. Se aplican las siguientes condiciones:

- A) La lente colectora proyecta la fuente de luz en el plano del diafragma de apertura.
- B) El diafragma de apertura está ubicado en el plano focal de la lente condensadora, y cada punto en el diafragma de apertura se visualiza en el infinito.
- C) El diafragma de campo se proyecta en el plano objeto del microscopio, ajustando correctamente la distancia entre la lente condensadora y el plano objeto.



**Figura 2.2:** Principio de iluminación de Köhler que utiliza la luz de una bombilla para iluminar homogéneamente el plano del objeto. Imagen de [13].

## 2.3 El software OpticStudio® de Zemax

El software OpticStudio de la empresa Zemax es uno de los más utilizados para el diseño de sistemas ópticos, destaca por disponer de elementos comercialmente disponibles, la posibilidad de simular casi cualquier tipo de sistema óptico y extraer numerosas figuras de mérito y representaciones. Dispone de dos métodos fundamentales de simulación, secuencial y no secuencial, que se utilizarán en este trabajo.

## Modos secuencial y no secuencial

En el modo secuencial, los rayos se propagan de un objeto al siguiente, pudiendo intersectar en cada superficie una sola vez y en el orden secuencial especificado. Los rayos podrían reflejarse solamente en el caso de seleccionar un espejo como material de la superficie. Además, cada superficie cuenta con su propio sistema de coordenadas local, es decir, la posición de cada superficie a lo largo del eje óptico está referenciada a la superficie anterior. Este modo se suele emplear para realizar análisis de imágenes y en sistemas afocales.

En el modo no secuencial, los rayos se propagan a través de los componentes ópticos en cualquier orden, y los rayos pueden dividirse, dispersarse y reflejarse de regreso al objeto. Se utiliza el modo no secuencial para aplicaciones que no sean puramente de imágenes, como sistemas de iluminación o análisis de luz parásita.

El trazado de rayos del modo no secuencial implica que no existe una secuencia predefinida donde deben impactar los rayos, sino que pueden impactar en cualquier parte y golpear el mismo objeto varias veces, o no golpearlo en absoluto. Sus componentes ópticos se modelan como verdaderos objetos tridimensionales, ya sea como superficies o como volúmenes sólidos. Además, cada objeto se sitúa globalmente en una coordenada  $x, y, z$  independiente, con una orientación definida y referenciado a una coordenada global.

Mientras que el modo secuencial solo permite utilizar fuentes puntuales, el modo no secuencial permite una gran libertad en el diseño de las fuentes, pudiendo situarlas en cualquier lugar, orientación o incluso dentro de otros objetos. Existen fuentes prediseñadas en bibliotecas de Zemax o pueden importarse datos de fuentes reales o programas externos.

Otra característica a destacar del modo no secuencial es que se puede realizar un rastreo de los rayos utilizando detectores y mediante el almacenamiento de los datos de los rayos en archivos de bases de datos. Los detectores se pueden modelar como superficies planas, curvas e incluso volúmenes tridimensionales.

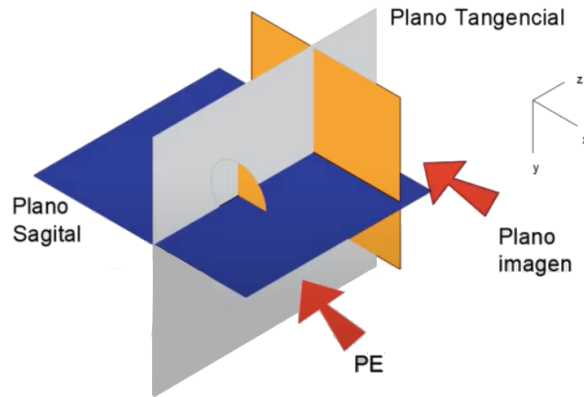
Cabe destacar que existe un modo mixto en el que se pueden utilizar trazas de rayos secuenciales y no secuenciales en un mismo sistema.

## Diagramas: spot y ray fan

En la Figura 2.3 se muestra un esquema de los planos en los que trabaja Zemax. Se denomina plano tangencial al definido por el eje óptico y el objeto, es decir, al plano  $YZ$ . Los rayos en este plano desde el objeto definen el diagrama ray fan, calculándose siempre a lo largo del eje  $y$  local en el espacio del objeto. Por otra parte, el plano sagital es ortogonal al plano  $YZ$ , e interseca en el centro de la pupila de entrada. Los datos sagitales se calculan a lo largo del eje  $x$  en el espacio del objeto.

En el **diagrama ray fan** se representan las posiciones de los rayos en la pupila de entrada frente a su posición en el plano imagen. El cero local del gráfico es el chief ray, que es el rayo procedente del objeto que pasa por el centro de la pupila de entrada. En las representaciones del ray fan se muestran dos gráficos, en uno de ellos el eje de ordenadas se denota como “ $ey$ ”, refiriéndose a la componente tangencial, y en el otro se denota como “ $ex$ ”, referido a la componente sagital. El eje de abscisas en ambos gráficos se refiere a la posición de la pupila de entrada, normalizada desde  $x=-1$  hasta  $x=1$ .





**Figura 2.3:** Esquema de los planos en los que trabaja Zemax. Se representan los planos tangencial, sagital e imagen y la pupila de entrada del sistema. Imagen de [14].

Si el sistema no presentase aberraciones, todos los rayos salientes de un punto del objeto aterrizarían en la misma posición que el rayo principal, por lo que el diagrama ray fan solo tendría componente  $x$ . A partir del diagrama ray fan se puede determinar a simple vista la aberración predominante del sistema.

En la Figura A.1 se muestran las formas que presenta el diagrama ray fan para cada una de las aberraciones más comunes que se dan en los sistemas ópticos.

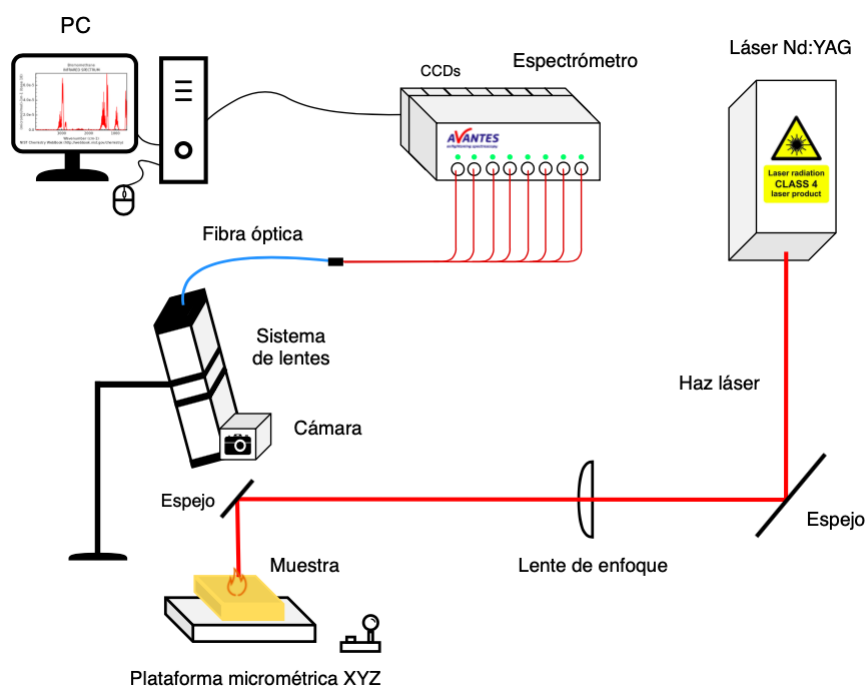
Por otra parte, el **diagrama de spot** simula el tamaño, la forma y la distribución de los rayos procedentes del objeto en el plano imagen. En lugar de un diagrama de rayos unidimensional, como es el caso del diagrama ray fan, se trata de una representación bidimensional.

En el Capítulo 4 también se menciona el **diagrama Seidel**. Se trata de un gráfico de barras en el cual se muestran los coeficientes de aberración de Seidel calculados automáticamente por Zemax. Estos coeficientes de Seidel son las contribuciones del segundo término del desarrollo en serie del seno, debido a los cuales se producen las principales aberraciones monocromáticas.

## Capítulo 3

### Equipo experimental

En la Figura 3.1 se muestra el equipo experimental utilizado para tomar medidas de espectroscopía LIBS en el laboratorio. Como fuente de excitación se ha utilizado un láser Nd:YAG de doble pulso. El haz láser saliente se refleja en dos espejos y es enfocado por una lente de focal  $f=75$  mm para incidir directamente sobre la muestra y ablacionarla. Para ello, se selecciona el punto exacto de incidencia en el material con ayuda de una cámara situada sobre la muestra. Al seleccionar un punto exacto de la imagen vista a través de la cámara, la plataforma micrométrica XYZ se desplaza hasta dejar centrado el plasma y que la luz resultante entre correctamente en un sistema de lentes. La imagen formada del plasma, después de pasar por el sistema de lentes, es recogida por una fibra óptica hasta llegar a un espectrómetro de ocho canales, que divide la señal luminosa en las diferentes longitudes de onda. Con ayuda de detectores CCD, la señal luminosa es transformada en señal eléctrica y es dirigida hacia un ordenador, que, con la ayuda de un software informático, permite visualizar y analizar el espectro LIBS resultante.



**Figura 3.1:** Esquema del equipo experimental utilizado.

Antes de tomar las medidas aplicando los fundamentos de LIBS, se ha utilizado como fuente un LED RGB con una pieza de material plástico blanco dispersivo en forma cilíndrica que modela muy bien la forma típica del plasma. La finalidad de utilizar este elemento es realizar un primer análisis de la eficacia del sistema de lentes utilizado para la homogeneización y captura de la luz recibida. Una vez comprobada la eficacia del sistema de lentes utilizado, se realizarán las medidas de espectroscopía LIBS con el láser.

A continuación, se va a realizar una descripción de los elementos que componen el esquema de la Figura 3.1.

## **Láser Nd:YAG**

El láser utilizado en el laboratorio es un modelo Lotis LS2143D. Se trata de un láser tipo Nd:YAG de doble pulso Q-Switch con tecnología de longitud de onda dual 532nm-1064nm. Consta de una fuente de alimentación (PS-2250), un emisor láser (LH-2134D), un sistema de refrigeración (CP-1125) y un sistema de control remoto (RC-6).

El láser emite 10 pulsos por segundo a 1064 nm, con duración de cada pulso de 15 ns y energía de 200 mJ por pulso. El haz láser resultante tiene un diámetro de 6 mm. Además, es focalizado sobre la muestra mediante una lente plano-convexa de focal  $f=75\text{mm}$ . Tras focalizarse, el haz ablaciona el material y genera un cráter de 200 micras de diámetro y unas pocas micras de profundidad. Los átomos de la pequeña porción de material ablacionado forman el plasma, que emite las líneas de emisión atómica analizadas posteriormente.

## **Plataforma micrométrica XYZ**

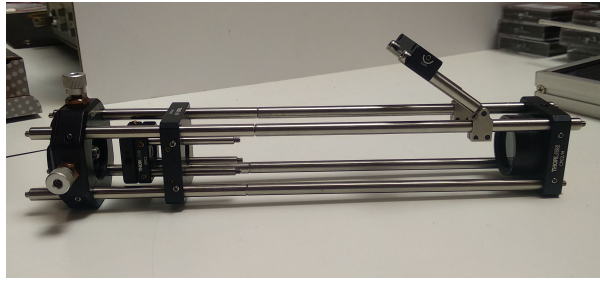
Se ha colocado el LED/material para ablacionar sobre una plataforma micrométrica motorizada en XYZ. Para tomar las medidas, se mueve la plataforma en el plano XZ, creando una matriz de posiciones 9x9, es decir, desplazándose cada 0.25 mm sobre el plano.

Inicialmente se trasladó el plasma sobre una región dos veces más grande, es decir, en intervalos de 0.5 mm, pero se consideró que se estaba abarcando demasiado espacio, lo cual podría afectar a la homogeneidad y captura luminosa. Más tarde se comprobó experimentalmente que esta reducción en el espacio de movimiento de la plataforma mejoraba considerablemente las distorsiones de los colores y las pérdidas de luz.

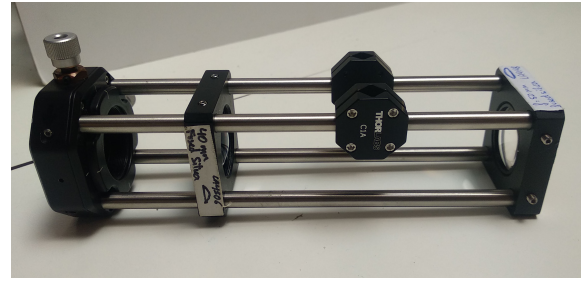
## **Sistema de lentes**

La finalidad de los sistemas de lentes como elemento recolector de luz es mejorar la eficiencia de captura antes de llegar al sistema de detección. Se van a recoger medidas experimentales de 2 diseños: el sistema de dos lentes original del laboratorio el Grupo de Ingeniería Fotónica de la UC y un sistema de cuatro lentes diseñado en Zemax.

Cabe destacar que el material de las lentes que se van a utilizar en este trabajo es siempre sílice fundida, ya que presenta una buena transmisión en el rango del ultravioleta (ver Figura 3.3a). En la Figura 3.3b se muestra la dependencia del índice de refracción de la sílice fundida con la longitud de onda, donde se observa una gran variación en el rango UV. Por lo tanto, se espera que el trazado de rayos de los sistemas de lentes contemplados en este trabajo funcionen peor para las longitudes de onda más cortas.

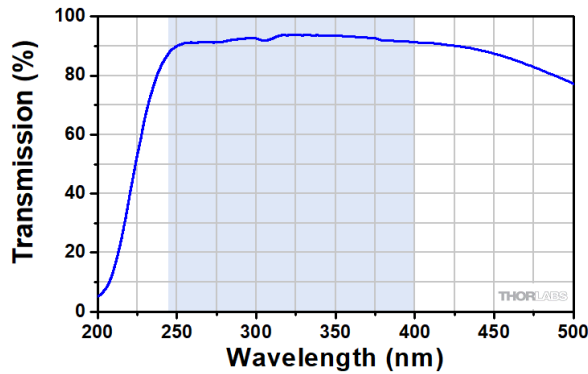


(a)

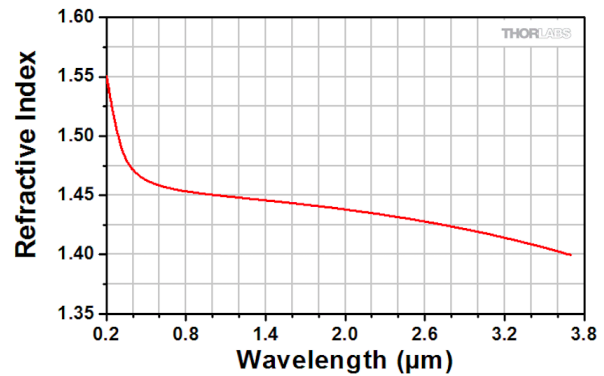


(b)

**Figura 3.2:** Sistemas: (a) de 4 lentes y (b) actual del laboratorio del GIF de 2 lentes.



(a)



(b)

**Figura 3.3:** (a) Transmisión en el rango UV de la sílice fundida. (b) Dependencia del índice de refracción de la sílice fundida con la longitud de onda. Imágenes de [15].

## Fibra óptica

La fibra óptica es el último elemento del montaje del sistema de lentes. Se van a utilizar dos fibras ópticas, que a partir de este momento se van a distinguir por el color de su recubrimiento: rojo o azul. La fibra óptica de color rojo tiene un diámetro de  $800 \mu\text{m}$  y está compuesta en realidad por 8 fibras individuales de 200 micras de diámetro de núcleo cada una, con apertura numérica  $AN=0.22$  y semiángulo de captura  $\alpha=16^\circ$ . La fibra óptica azul es única, con un diámetro de  $600 \mu\text{m}$  y la misma apertura numérica y ángulo de aceptación que la fibra óptica roja. En base a esto, se espera que utilizando la fibra azul se obtenga una mayor homogeneización de la luz, pero que suponga una mayor pérdida de luz debido a su tamaño reducido de diámetro con respecto a la roja. Cabe destacar que todos los diseños planteados en Zemax se han realizado suponiendo un tamaño de la imagen de  $800 \mu\text{m}$  (fibra roja), por lo que ya se supone esta pérdida de luz de antemano.

La fibra óptica azul siempre se encuentra conectada a la roja, ya que esta transporta la información asociada a cada longitud de onda de los diferentes canales para introducirla separadamente en el espectrómetro. Debido al carácter homogeneizador de las fibras ópticas, la señal luminosa procedente de la fibra azul entra a la fibra roja de forma homogénea, mucho más que si se utilizase solo la roja. Se espera que la mayoría de la luz entre en el canal 1 o central, que se corresponde con el canal UV. Este canal se posiciona en el centro para recoger una mayor cantidad de luz en la zona del espectro más problemática.

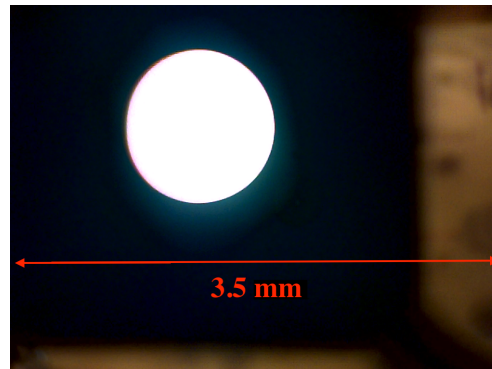
Cuando se toman las primeras medidas utilizando el LED como fuente luminosa solamente interesan los canales 5, 6 y 7 de la fibra roja, correspondientes a las longitudes de onda asociadas a los colores rojo, verde y azul que caracterizan al LED. Estos canales se encuentran equiespaciados con respecto al centro de la fibra, es decir, a  $120^\circ$ . Si el sistema funcionase correctamente debería entrar la misma cantidad de luz por los 3 canales.

Se ha realizado siempre el mismo procedimiento para evitar posibles errores sistemáticos: primero se ha alineado el sistema midiendo con la fibra óptica azul+roja, y, después, sin mover el sistema, se ha medido utilizando la fibra óptica roja.

## Cámaras

A lo largo del proceso de recogida de información se han empleado dos cámaras. Una de ellas se coloca enfocando al LED/pluma de plasma desde arriba, utilizada como referencia para visualizar la posición del LED/plasma sobre la plataforma micrométrica y centrarlo correctamente. En el caso de las medidas LIBS, permite indicar el punto exacto de incidencia del láser sobre la muestra con ayuda de un programa informático.

La otra cámara se instala ocasionalmente para visualizar la imagen producida tras el paso de la luz dentro del sistema de lentes. De esta forma, se puede calcular fácilmente el tamaño del spot imagen conociendo el tamaño del detector de la cámara. Concretamente, 1024 píxeles equivalen a 3.5 mm. La conversión se realiza con una simple regla de tres, tomando una foto de la imagen captada por el software informático de la cámara. De esta forma, se puede tener una idea de cómo de bien entraría dicha imagen en la fibra óptica, y permite señalar el punto exacto donde hay que situar la fibra óptica al retirar la cámara. En la Figura 3.4 se muestra un ejemplo de imagen del spot visualizado con esta cámara.



**Figura 3.4:** Fotografía realizada con una cámara situada en el plano imagen del sistema de lentes. Conociendo que los 1024 píxeles equivalen a 3.5 mm, se obtiene un diámetro de spot  $d=1.05$  mm.

## Espectrómetro

Se utiliza el modelo AvaSpec-ULS2048-USB2-RM. Consta de 8 canales con detectores CCD de 2048 lambdas en cada uno de ellos. El diseño del espectrómetro es de tipo Czerny-Turner simétrico, con 75 mm de focal. En conjunto divide la señal recibida en diferentes componentes, en el rango 190 nm - 900 nm, discriminando unas 16000 longitudes de onda individuales en ese rango.

El CCD es el encargado de transformar los fotones recibidos en el espectrómetro en señal eléctrica, que se envía al PC para realizar el análisis. Cada vez que se hace una lectura de la información contenida en el CCD, se borra el contenido de sus celdas y queda preparado para la siguiente lectura. Todo este proceso se produce en intervalos iguales al tiempo de integración fijado previamente.

## Software

En análisis de los datos recogidos se realiza mediante códigos de Matlab realizados en el Grupo de Ingeniería Fotónica.

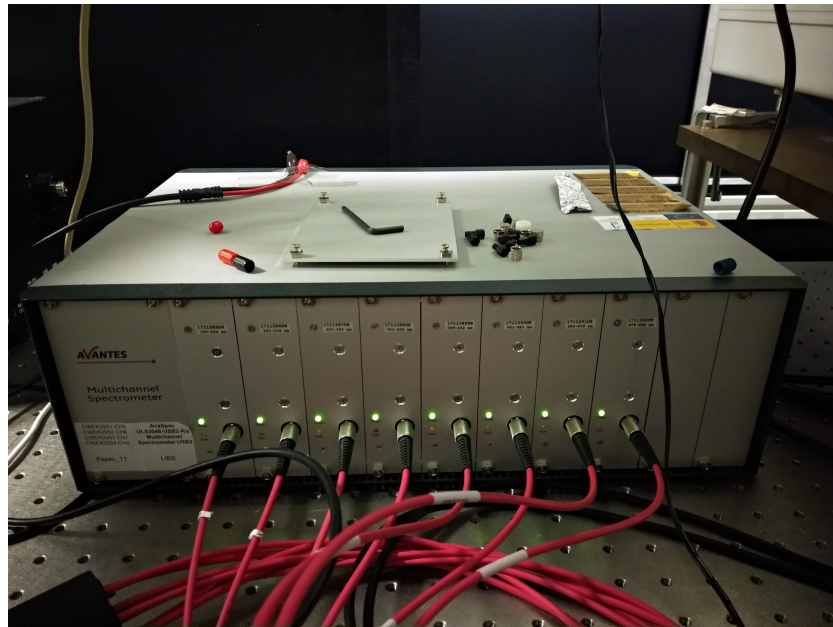
**Para las medidas con el LED como fuente.** El código obtiene los espectros de energía para cada canal del espectrómetro y calcula la energía total integrando la curva obtenida. Obtiene también una serie de gráficas que permiten determinar la eficacia del sistema de lentes empleado. En el Capítulo 4 se muestra, para cada caso estudiado, una primera gráfica en la que se ha calculado el punto con mayor intensidad, y, con ello, se realiza la representación del perfil normalizado de los canales estudiados. La segunda imagen se trata de otro gráfico como el anterior, pero restando el valor máximo al resto de valores tomados. Cabe destacar que lo primero de todo se toma una medida del background y se resta a todas las medidas realizadas.

Otro indicador de lo bien que funciona el sistema de lentes empleado es lo que en el código se denomina "Diferencia chx, chy, y chz". Se trata de las diferencias de energía por mm de movimiento en cada una de las direcciones estudiadas. Lo que hace realmente es seleccionar dos posiciones en torno al máximo, restarlas y dividir las entre la distancia entre ellas. Este valor resultante debería ser muy cercano a 0 si el sistema homogeneiza correctamente.

Por otra parte, el tiempo de integración, o tiempo en el que se promedia la señal a cada longitud de onda medida, es otro elemento a tener en cuenta sobre la calidad (relación señal-ruido) de la señal analizada. Es necesario buscar una buena relación entre el tiempo de exposición y la calidad de la señal. Cabe destacar que el tiempo de integración establecido anteriormente en el laboratorio era  $t_{int} \approx 500$  ms.

**Para las medidas de espectroscopía LIBS** realizadas en este trabajo se ha utilizado un código a medida realizado en el grupo de ingeniería fotónica, que controla de forma automatizada la emisión del láser, el movimiento de la plataforma XYZ con la muestra, y la captura de los espectros de emisión atómica, todo de forma sincronizada. La muestra utilizada ha sido latón (aleación de zinc y cobre), que es usado habitualmente como muestra de calibración ya que es un material homogéneo y fácil de mecanizar que proporciona una gran variedad de líneas de emisión intensa en diferentes rangos espectrales. Los experimentos se han realizado con una energía del pulso del láser de 40mJ por pulso, en ráfagas de 50 disparos con una frecuencia de 10Hz. El espectro es recogido con un retraso de 1  $\mu$ s respecto a la emisión láser, y con una ventana de captura de 1ms, la mínima posible para el espectrómetro. Los 8 canales de información espectral son fundidos para eliminar longitudes de onda solapadas, resultando en unas 16000 longitudes de onda. Cada ráfaga de 50 disparos es repetida en 5 puntos diferentes de la superficie de la pieza de latón. El resultado de cada experimento es una matriz de medidas de 5 x 50 x 16000 valores. Otro código realiza el procesado automático de estos espectros, en concreto:

- Eliminación del ruido electrónico aditivo del CCD – Promediado de los espectros – Ajuste de los picos de emisión mediante funciones lorentzianas – Estimación de la radiación de fondo bajo los picos – Cálculo del área de los picos – Cálculo de cocientes (ratios) entre parejas de pico – Estimación de la variabilidad de las medidas (RSD).



**Figura 3.5:** Espectrómetro AvaSpec-ULS2048-USB2-RM.



**Figura 3.6:** Láser Nd:YAG Lotis LS2143D.



# Capítulo 4

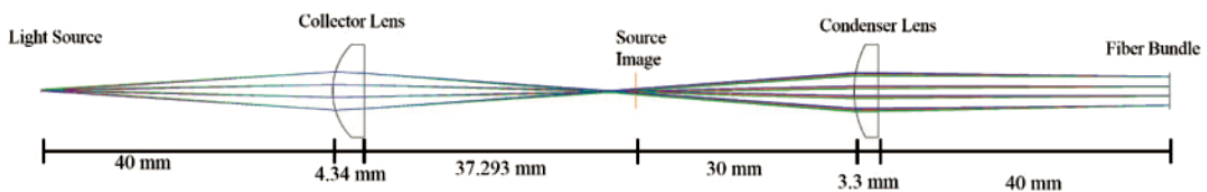
## Resultados y análisis

Después de haber tenido en cuenta todas las explicaciones necesarias de los Capítulos 2 y 3, es el momento de presentar los resultados propios de este trabajo. El capítulo se va a estructurar de la siguiente forma: primero se realizará una descripción del proceso seguido antes de llegar al diseño final, ofreciendo las correspondientes simulaciones en Zemax. Una vez escogida la simulación más eficiente, se probará experimentalmente, primero utilizando como fuente luminosa un LED para estudiar el grado de homogeneización y captura luminosa, y después haciendo medidas de espectroscopía LIBS.

Cabe destacar que todos los parámetros de los diseños de Zemax que se van a mostrar en este capítulo se adjuntan en el Apéndice B.

### 4.1 Simulaciones

La idea principal de este trabajo es comprender el artículo [16] para diseñar un sistema de lentes, utilizando la teoría de iluminación Köhler, que funcione mejor que el diseño disponible actualmente en el laboratorio del GIF. El diseño del artículo [16] es el siguiente:



**Figura 4.1:** Sistema de lentes empleado en [16].

Se trata de un sistema de dos lentes en serie, donde la primera lente proyecta la imagen del objeto sobre su plano imagen, y ese plano es el plano objeto de la segunda lente. Como la distancia entre el foco de la primera lente a la segunda lente es la distancia focal de la segunda lente, los rayos salen del sistema colimados, cumpliendo así con el objetivo del diseño, obtener una imagen cuyas longitudes de onda se distribuyan homogéneamente en el plano imagen.



Al recrear en Zemax el diseño de la Figura 4.1 se encontraron varios problemas. El principal, que los rayos no salen perfectamente colimados para el rango de longitudes de onda en el que se trabaja en LIBS (200 nm - 900 nm), algo que hace pensar que en el artículo [16] faltarían especificaciones del diseño para poder reproducirlo, tal como diafragmas de apertura, ya que en la Figura 4.1 se puede ver que existe cierta limitación de apertura en las lentes. Otro problema importante que se ha encontrado es que el tamaño de la imagen es muy grande en comparación al tamaño del tipo de fibra óptica que se suele utilizar en este tipo de trabajos. Esto es debido a que el bundle de fibras que han utilizado tiene 7 fibras de 600  $\mu\text{m}$  cada una, y en conjunto formarían un diámetro de fibra próximo a 2 mm, que supera el doble del tamaño de la fibra que se utiliza en este proyecto.

## Diseños propios

Todos los diseños que se van a simular en Zemax deben cumplir los siguientes requisitos:

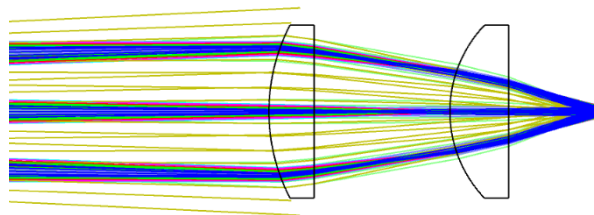
- Un objeto (el plasma) de 2 mm debe dar lugar a una imagen de 0.8 mm a su paso por el sistema.
- El sistema no puede superar los 40 cm de longitud total.
- Se deben utilizar lentes del catálogo de Thorlabs [15] con tamaño 0.5/1", que causen las menores aberraciones posibles a la imagen final y cuyo material sea sílice fundida, ya que se busca una buena transmisión en el UV (Figura 3.3a).

Con estas condiciones, primero se intentó crear un sistema de **dos lentes**, al igual que se hace en el artículo mencionado previamente. No obstante, no se consiguió combinar las lentes de manera que la imagen producida tuviese un diámetro igual o inferior a 0.8 mm.

Ante la imposibilidad de crear un diseño de dos lentes, se ha probado a diseñar uno de **tres lentes**. Para ello, se ha utilizado un reductor, es decir, dos lentes que cumplan que la relación  $f_2/f_1$  sea mucho menor que 1, y, además, que la distancia entre dichas lentes sea aproximadamente  $f_1+f_2$  para que los rayos salgan colimados. Se ha añadido una tercera lente con distancia focal lo más pequeña posible para inclinar ligeramente los rayos. El resultado se muestra en las Figuras 4.2 y 4.3.

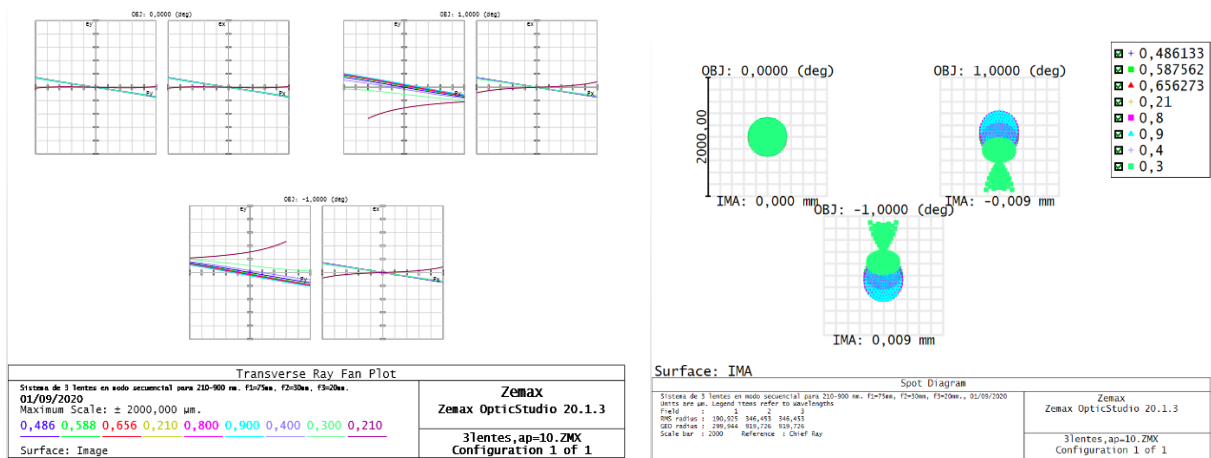


**Figura 4.2:** Diseño de 3 lentes. Se han utilizado lentes con distancias focales  $f_1=75$  mm,  $f_2=30$  mm y  $f_3=20$  mm. La longitud total del sistema es  $L=395$  mm.



**Figura 4.3:** Ampliación de la Figura 4.2 en las proximidades del plano imagen.

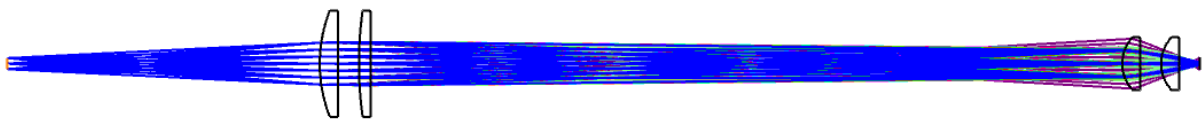
En la Figura 4.4 se muestra el diagrama ray fan (derivada del mapa de la sección eficaz del frente de onda) y el diagrama de spot correspondiente al diseño de la Figura 4.2.



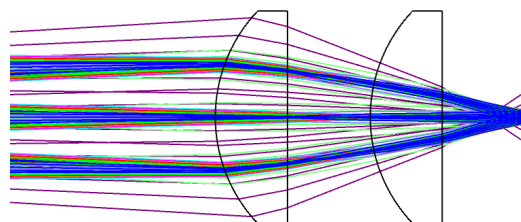
**Figura 4.4:** Para el sistema de 3 lentes: (a) diagrama ray fan y (b) diagrama de spot.

En las Figuras 4.2, 4.3 y 4.4 se observa que el diseño de 3 lentes no funciona correctamente para las longitudes de onda más cortas, lo cual era esperado. Además, la forma de la representación del diagrama ray fan, que permite identificar qué aberraciones están presentes en el sistema (ver Apéndice A), revela que para el campo  $y=0$  el efecto de las aberraciones es menor, mientras que para los campos  $y=\pm 1$ , las aberraciones están presentes en mayor medida para determinadas longitudes de onda. Consultando el diagrama Seidel asociado al sistema de 3 lentes, las aberraciones dominantes para todas las longitudes de onda consideradas son: distorsión y aberración cromática lateral.

A pesar de que funciona relativamente bien, el tamaño total del sistema es demasiado largo, en el límite posible para poder montarlo en el equipo experimental disponible en el laboratorio. Ante la necesidad de hacer un diseño todavía más compacto, se ha añadido una **cuarta lente**. Primero, se ha colocado una primera lente a distancia del objeto igual a su focal para que los rayos salgan de la lente colimados. Tras ver cuál es el tamaño del haz saliente, se ha añadido un reductor y una lente de focal pequeña para inclinar los rayos de la misma forma que en el caso anterior de 3 lentes. En las Figuras 4.5 y 4.6 se observa el resultado de la simulación de este diseño de 4 lentes.

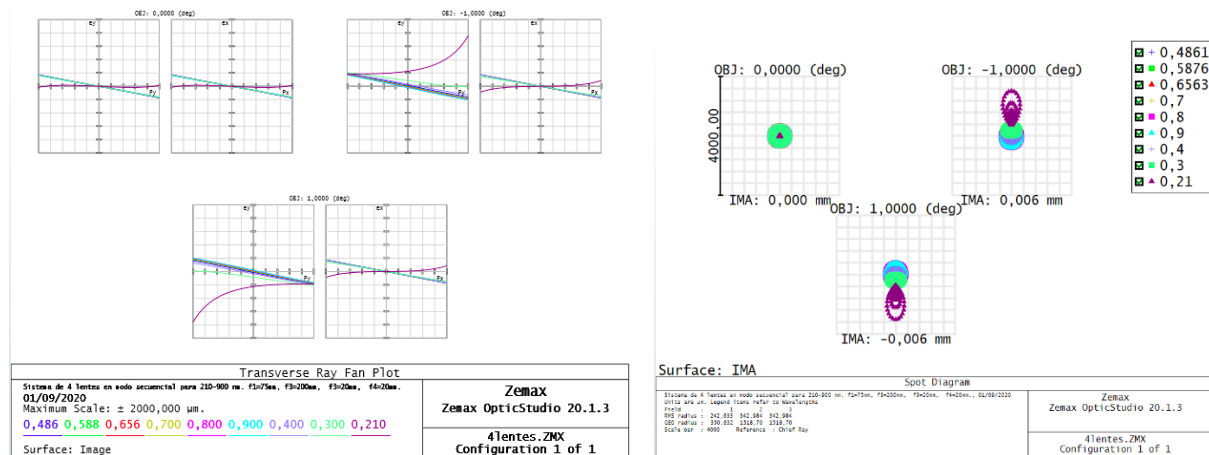


**Figura 4.5:** Diseño de 4 lentes. Se han utilizado lentes con distancias focales  $f_1=75 \text{ mm}$ ,  $f_2=200 \text{ mm}$ ,  $f_3=20 \text{ mm}$  y  $f_4=20 \text{ mm}$ . La longitud total del sistema es  $L=286 \text{ mm}$ .



**Figura 4.6:** Ampliación de la Figura 4.5 en las proximidades del plano imagen.

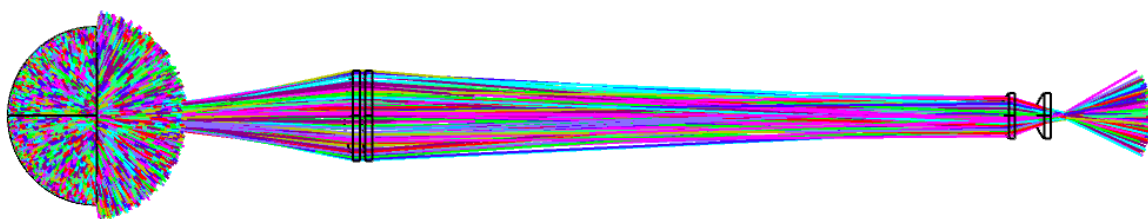
En la Figura 4.7 se muestran los diagramas ray fan y de spot correspondientes al diseño 4 lentes de la Figura 4.5.



**Figura 4.7:** Para el sistema de 4 lentes: (a) diagrama ray fan y (b) diagrama de spot.

En la Figura 4.7 se observa que el sistema funciona adecuadamente en cuando a homogeneización, salvo para las longitudes de onda del UV, tal y como se esperaba. Se ha intentado que el sistema funcione correctamente para una longitud de onda intermedia en el rango a estudiar,  $\lambda=200\text{-}900 \text{ nm}$ , asumiendo que para las longitudes de onda más bajas el sistema actúa peor. Los diagramas de spot y ray fan permiten identificar aberraciones, pero se ha consultado el diagrama Seidel para tener una mayor certeza. Al igual que para el sistema de 3 lentes, el diagrama revela que las aberraciones dominantes son: distorsión y aberración cromática lateral.

Se ha considerado que este diseño de 4 lentes es un claro candidato a ser reproducido en el laboratorio, y, por lo tanto, se ha simulado en el modo no secuencial de Zemax para recrear un comportamiento más cercano a lo que sucedería experimentalmente, el resultado se muestra en la Figura 4.8.

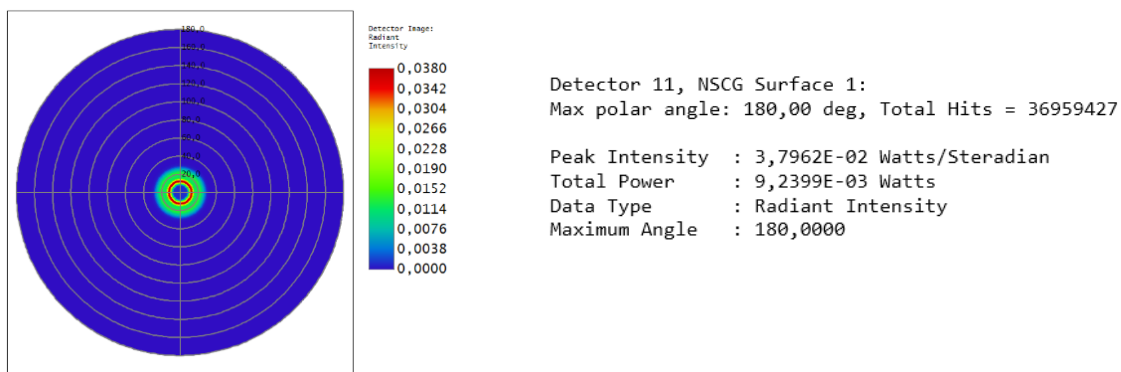


**Figura 4.8:** Diseño de 4 lentes en modo no secuencial.

En la Figura 4.8 se observa una superficie reflectante esférica ubicada cerca de la fuente. Ha sido necesario introducir este elemento debido a que la fuente emite una cantidad de rayos muy elevada y en el sistema solo entran unos pocos. Se necesita forzar la entrada de un mayor número de rayos en el sistema para intuir con mayor facilidad el comportamiento de los mismos en el plano imagen.

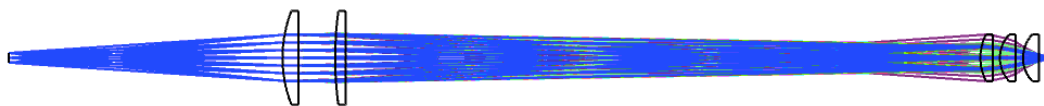
Como fuente luminosa, se ha utilizado una lámpara de filamento por sus características de emisión. Se ha seleccionado una potencia  $P=1$  W, dimensiones  $2 \times 1$  mm, número de vueltas  $N=20$  y una emisión omnidireccional de  $4 \cdot 10^9$  rayos en el rango  $\lambda=200-900$  nm.

Tal y como se esperaba, el sistema en modo no secuencial funciona peor que en el modo secuencial en cuanto a homogeneización de la luz. Para el **estudio de la eficiencia de la captura de luz** de este sistema de cuatro lentes se coloca un detector polar de tamaño igual al de la fibra óptica en el plano imagen con el fin de obtener la cantidad de luz recibida con respecto a la potencia total emitida por la fuente,  $P=1$  W. Se ha obtenido que el sistema capta una potencia  $P_{detec} \approx 9$  mW. En la Figura 4.9 se muestra la información extraída del detector.



**Figura 4.9:** Información extraída del detector situado en el plano imagen de la Figura 4.8.

En la Figura 4.10 se muestra otro diseño, en este caso de **5 lentes**, candidato a ser probado en el laboratorio. El planteamiento seguido es el mismo que en el caso de 4 lentes, pero añadiendo una quinta lente pegada a la última para inclinar aún más los rayos y reducir el tamaño de la imagen. El resultado ha sido muy similar al del caso anterior, con la diferencia de que se obtiene una imagen algo más pequeña y el sistema permite abrir ligeramente su apertura y seguir colimando perfectamente. No obstante, se ha considerado que añadir un elemento más al sistema supone más problemas que soluciones.



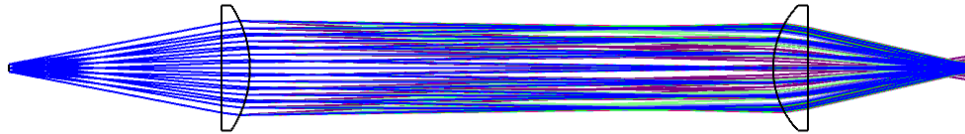
**Figura 4.10:** Diseño de 5 lentes, con distancias focales  $f_1=75$  mm,  $f_2=200$  mm,  $f_3=30$  mm,  $f_4=20$  mm y  $f_5=20$  mm. La longitud total del sistema es  $L=286$  mm.

En definitiva, el diseño que mejor se ajusta al objetivo de este trabajo es el sistema de 4 lentes de la Figura 4.5, y, por lo tanto, es el que se va a probar experimentalmente en la siguiente sección.

## Diseño actual del laboratorio del GIF

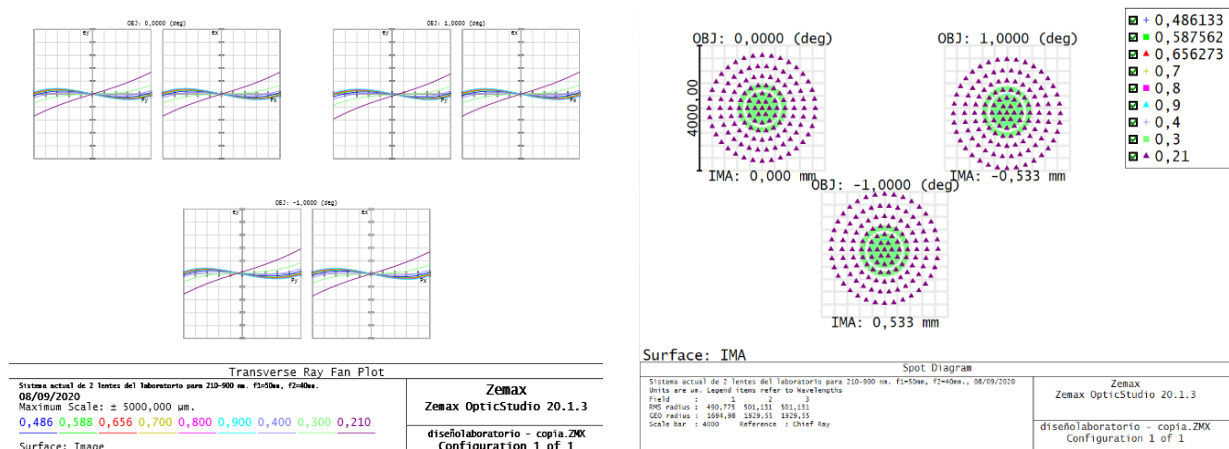
En la Figura 4.11 se muestra una recreación en Zemax del diseño de lentes que se utiliza actualmente para hacer espectroscopía LIBS en el laboratorio del Grupo de Ingeniería Fotónica de la UC. Tal y como se observa en la misma figura, el sistema no colima los

rayos, sino lo contrario, focalizan en un punto, formando imagen. Esto es lo que se quiere evitar en este trabajo. Además, a diferencia de los diseños propios de este trabajo, en los que el tamaño de la imagen es siempre inferior a 0.8 mm, en este caso el tamaño de la imagen es de 2 mm, lo cual significa que se va a perder una gran cantidad de luz en la entrada de la fibra óptica.



**Figura 4.11:** Sistema de 2 lentes del laboratorio del GIF, con  $f_1 = 50\text{mm}$ ,  $f_2 = 40\text{mm}$ . La longitud total del sistema es  $L = 197\text{mm}$ .

En la Figura 4.12 se muestran los diagramas ray fan y de spot asociados a la Figura 4.11.



**Figura 4.12:** Para el sistema del laboratorio: (a) diagrama ray fan y (b) de spot.

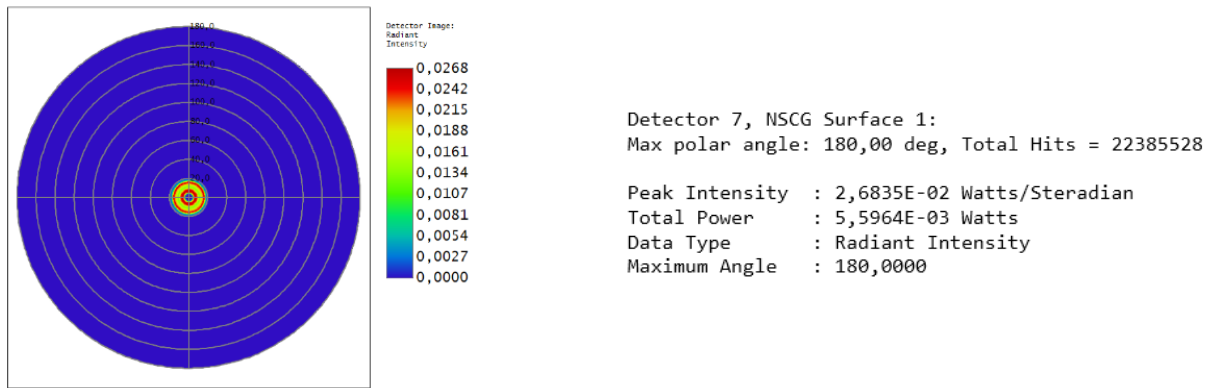
De las Figuras 4.11 y 4.12 se observa que este sistema también falla en el rango UV. A partir de los diagramas de la Figura 4.12, se puede afirmar con certeza que presenta aberración esférica, ya que los puntos que aparecen en el diagrama de spot tienen una forma perfectamente circular y la forma de la curvatura de las representaciones del diagrama ray fan es característica de esta aberración. El diagrama Seidel revela que también predomina la aberración cromática lateral.

Se ha colocado un detector con las mismas características que el de la Figura 4.9 del sistema de 4 lentes en modo no secuencial para comparar ambos sistemas de captura. Se ha obtenido que el sistema capta una potencia  $P_{detec} \approx 6 \text{ mW}$ , siendo  $P=1 \text{ W}$  la potencia emitida por la lámpara de filamento en el modo no secuencial de Zemax. En la Figura 4.13 se muestra la información extraída del detector.

Por lo tanto, queda verificado mediante simulaciones que el sistema de 4 lentes diseñado en este trabajo funciona mejor que el sistema disponible en el laboratorio del GIF, tanto para capturar como para homogeneizar la luz emitida por una fuente omnidireccional.

En la siguiente sección se van a comparar estos dos diseños experimentalmente para confirmar si en el laboratorio se obtendrían los mismos resultados.





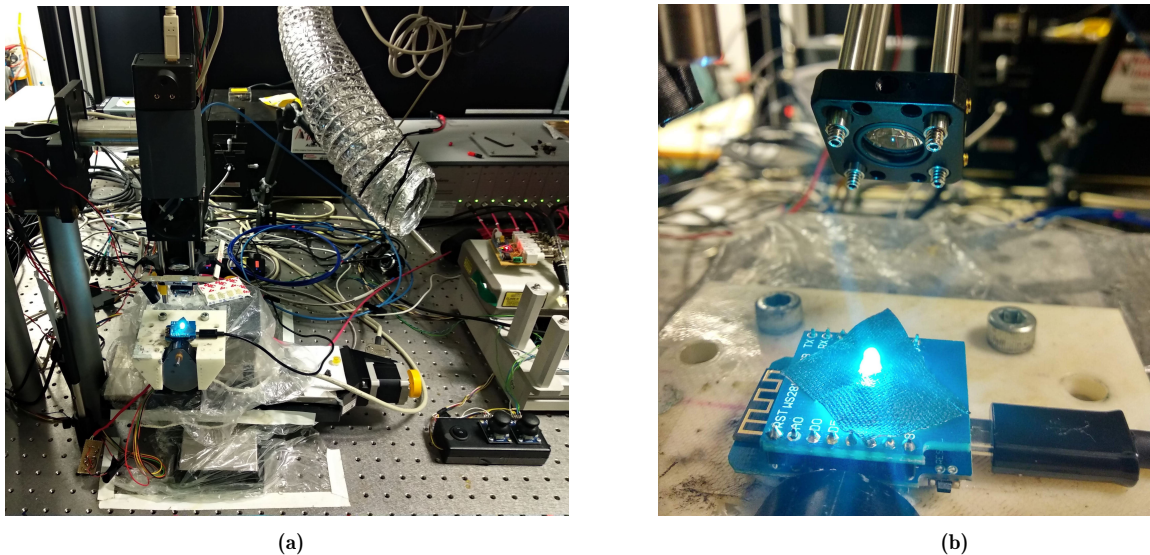
**Figura 4.13:** Información extraída del detector situado en el plano imagen de la Figura 4.11.

## 4.2 Resultados experimentales

### 4.2.1. Medidas utilizando un LED

Se ha utilizado un programa de Matlab que procesa los experimentos en los que se utiliza el LED RGB como fuente luminosa para evaluar la captura de luz y el grado de homogeneización del sistema de lentes utilizado. Dicho programa calcula el punto de mayor intensidad detectado y elabora diferentes gráficos para analizar la cantidad de luz recogida en cada canal. Se va a denotar como canal 5 al canal correspondiente a las longitudes de onda del azul, canal 6 al asociado al verde y canal 7 al rojo.

Para todos los casos estudiados se van a mostrar 5 gráficas. En la primera se muestran los espectros normalizados en una misma representación, en la segunda se muestra la misma representación pero restando el espectro de máxima energía, y las tres últimas corresponden a las energías normalizadas con respecto a la energía total del espectro.



**Figura 4.14:** (a) Montaje experimental utilizado en el laboratorio. (b) Fuente LED RGB iluminando el sistema de lentes sobre una plataforma micrométrica XYZ.

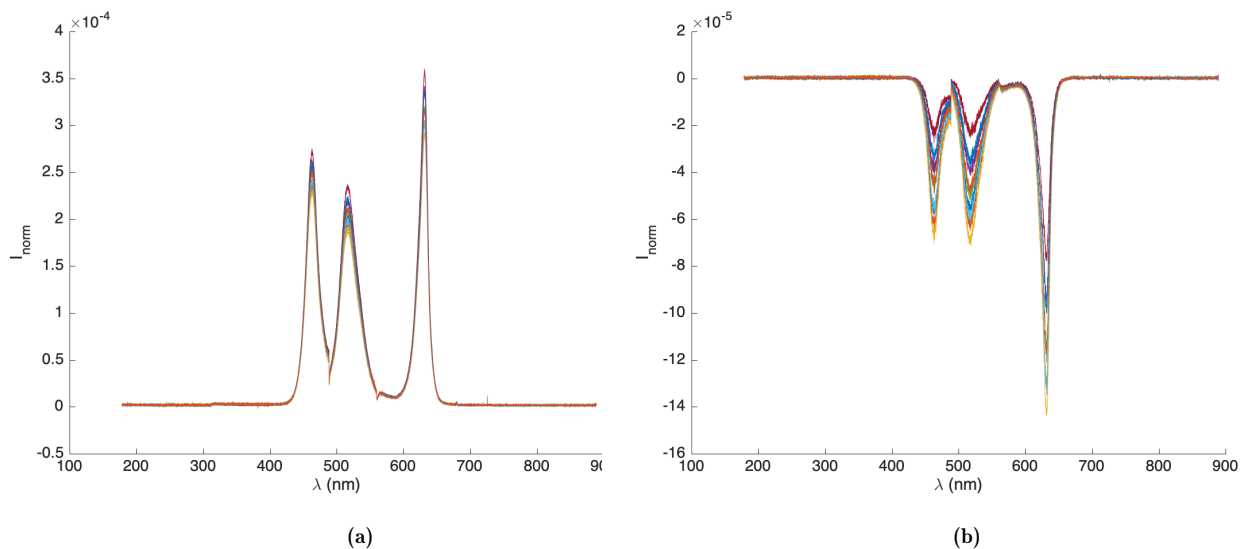
Un indicador de lo bien que puede funcionar el sistema empleado es lo que se va a denominar "Diferencia Chx, Chy y Chz". Se trata de las diferencias de energía por mm de movimiento en cada una de las direcciones estudiadas. Lo que hace realmente es seleccionar dos posiciones en torno al máximo, restarlas y dividir las entre la distancia entre ellas. Si el sistema funcionase adecuadamente, estos valores deberían ser muy cercanos a 0.

Finalmente, se va a indicar la cantidad de luz recogida relativa a una medida realizada previamente con el sistema del laboratorio para comprobar si la captura de luz con el sistema propuesto es mejor que la del sistema del laboratorio.

Como ya se ha explicado en el Capítulo 3, todos los diseños se van a probar con la fibra óptica roja y con la fibra azul unida a la roja para comparar el efecto de ambas fibras.

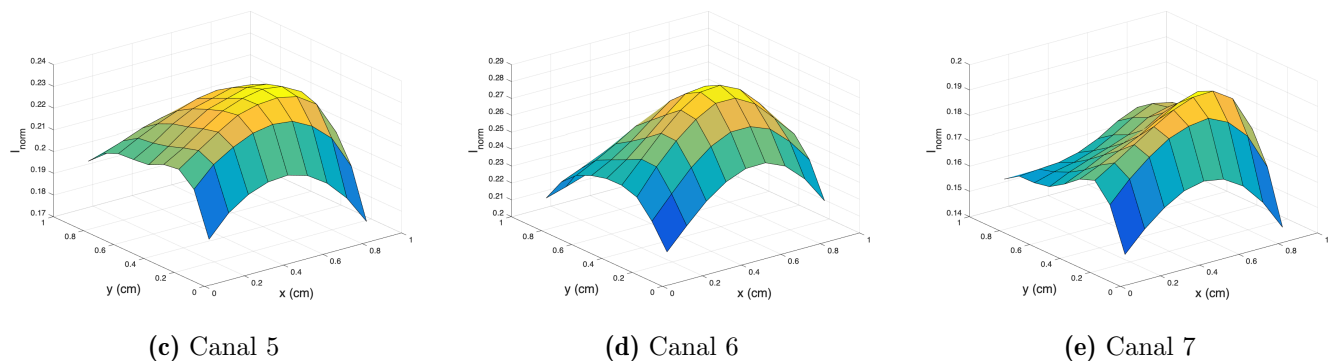
### Diseño de 4 lentes utilizando la fibra óptica azul+roja

En la Figura 4.15a se muestra la gráfica de los espectros normalizados, y en la Figura 4.15b se muestran los espectros normalizados restando el de máxima energía.



**Figura 4.15:** (a) Representación de los espectros normalizados obtenidos. (b) Espectros normalizados restando el de máxima energía.

En la Figura 4.16 se muestran, para cada canal estudiado, los perfiles de las energías normalizadas con respecto a la energía total del espectro.



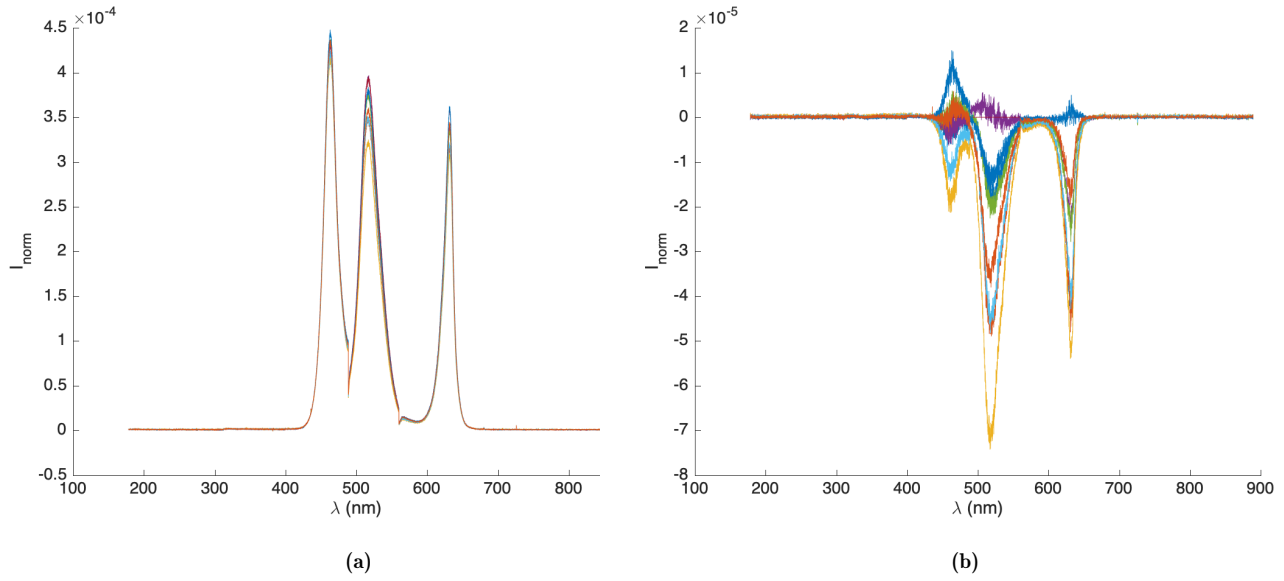
**Figura 4.16:** Energías normalizadas con respecto a la energía total del espectro.

Diferencia Ch5 x: -0.017, Diferencia Ch6 x: -0.033, Diferencia Ch7 x: -0.001,  
Diferencia Ch5 y: 0.002, Diferencia Ch6 y: 0.013, Diferencia Ch7 y: -0.006.

Luz recogida relativa a una medida con el sistema anterior (2 lentes) del laboratorio: **0.59**

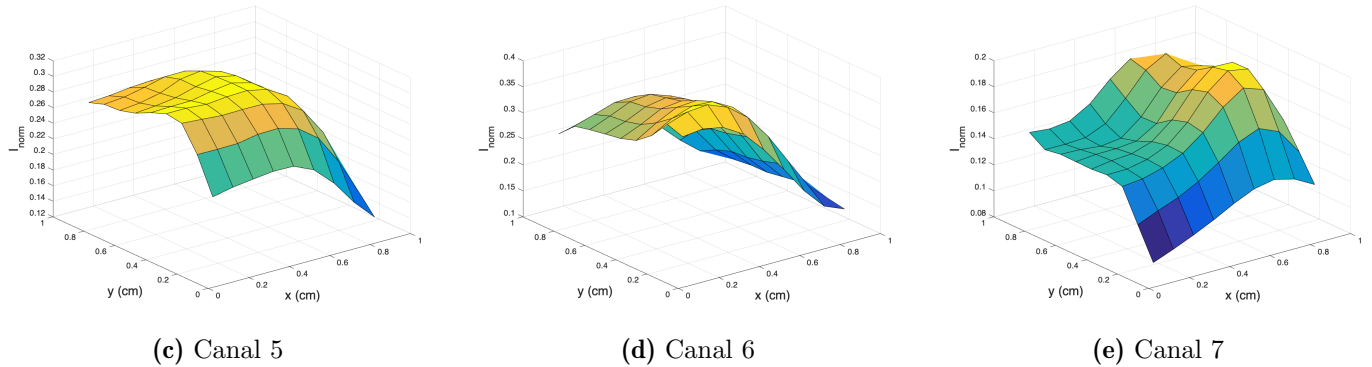
### Diseño de 4 lentes utilizando la fibra óptica roja

En la Figura 4.17a se muestra la gráfica de los espectros normalizados, y en la Figura 4.17b se muestran los espectros normalizados restando el de máxima energía.



**Figura 4.17:** (a) Representación de los espectros normalizados obtenidos. (b) Espectros normalizados restando el de máxima energía.

En la Figura 4.18 se muestran, para cada canal estudiado, los perfiles de las energías normalizadas con respecto a la energía total del espectro.



**Figura 4.18:** Energías normalizadas con respecto a la energía total del espectro.

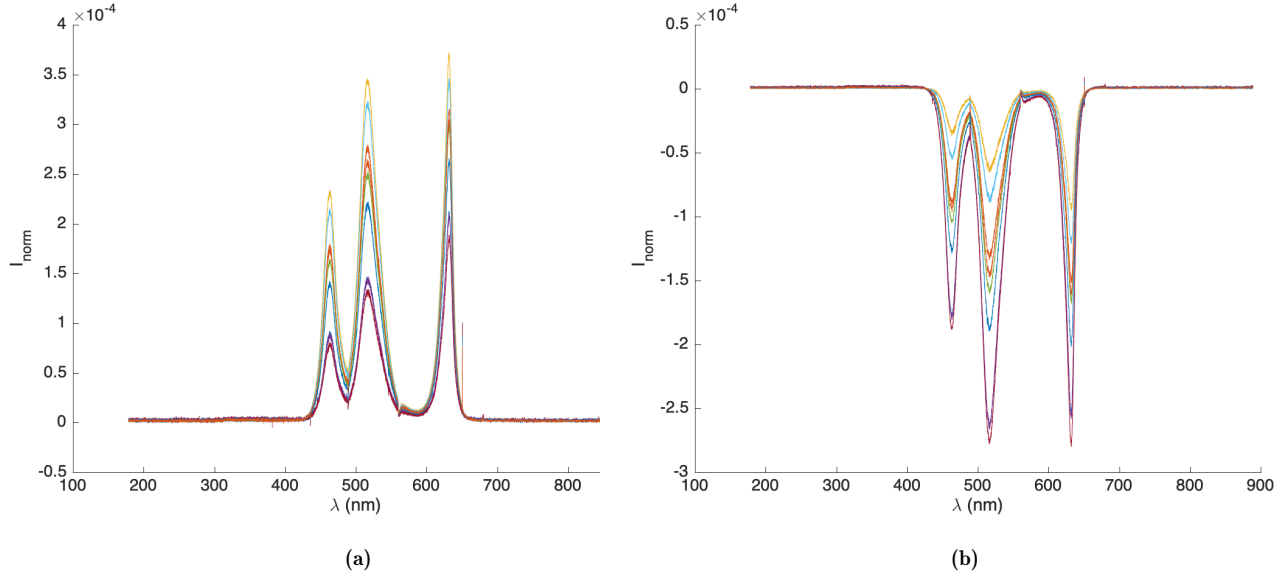
Diferencia Ch5 x: -0.059, Diferencia Ch6 x: 0.028, Diferencia Ch7 x: -0.034,  
Diferencia Ch5 y: -0.001, Diferencia Ch6 y: 0.046, Diferencia Ch7 y: -0.037.

Luz recogida relativa a una medida con el sistema anterior (2 lentes) del laboratorio: **0.95**



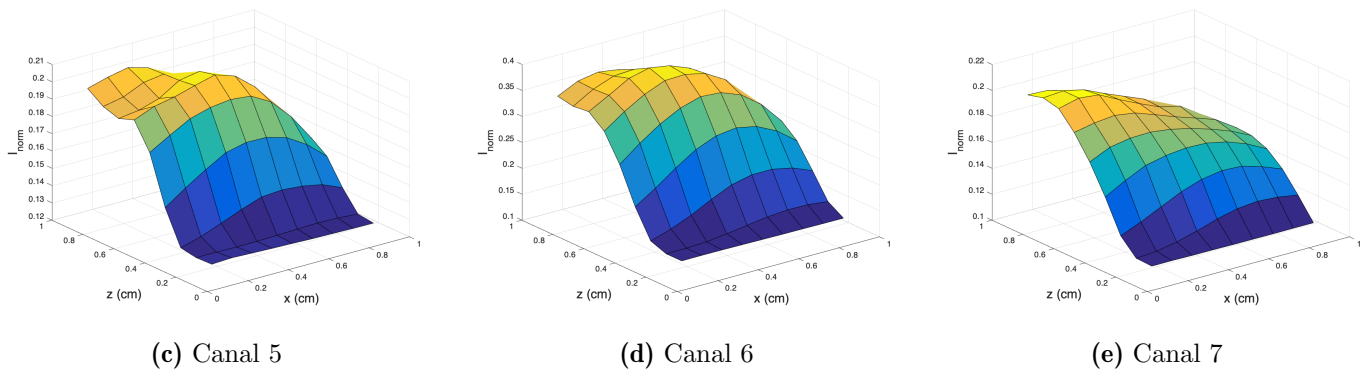
## Diseño de 2 lentes del laboratorio utilizando la fibra óptica azul+roja

En la Figura 4.19a se muestra la gráfica de los espectros normalizados, y en la Figura 4.19b se muestran los espectros normalizados restando el de máxima energía.



**Figura 4.19:** (a) Representación de los espectros normalizados obtenidos. (b) Espectros normalizados restando el de máxima energía.

En la Figura 4.20 se muestran, para cada canal estudiado, los perfiles de las energías normalizadas con respecto a la energía total del espectro.



**Figura 4.20:** Energías normalizadas con respecto a la energía total del espectro.

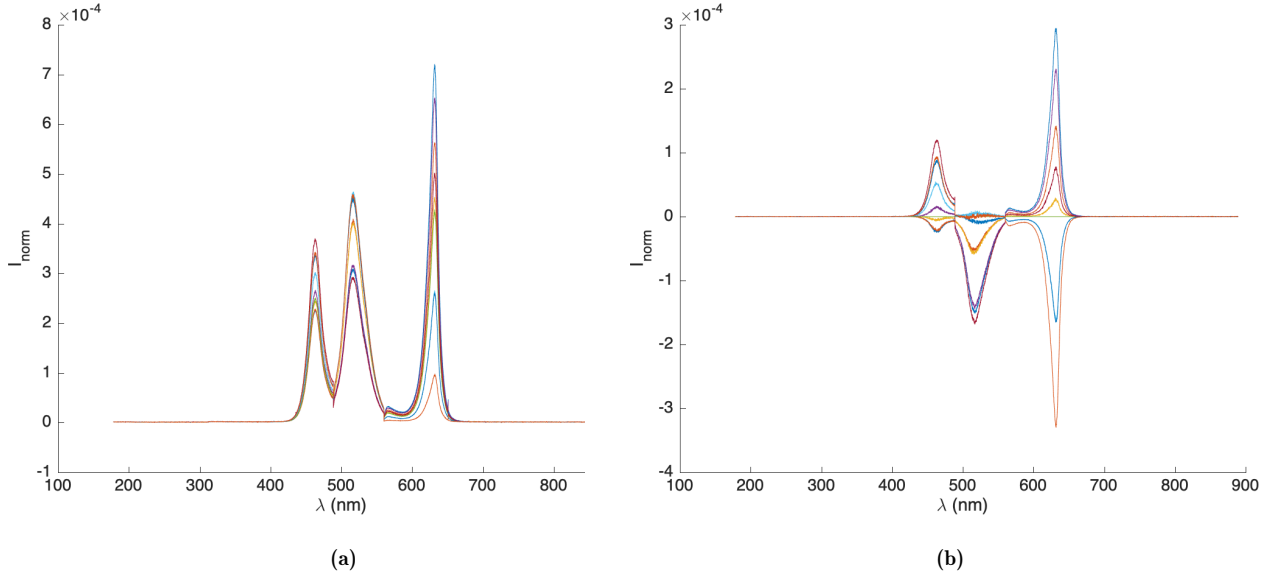
Diferencia Ch5 x: 0.003, Diferencia Ch6 x: 0.012, Diferencia Ch7 x: -0.008,

Diferencia Ch5 y: -0.019, Diferencia Ch6 y: -0.006, Diferencia Ch7 y: 0.030.

Luz recogida relativa a una medida realizada con este mismo sistema de 2 lentes: **0.59**

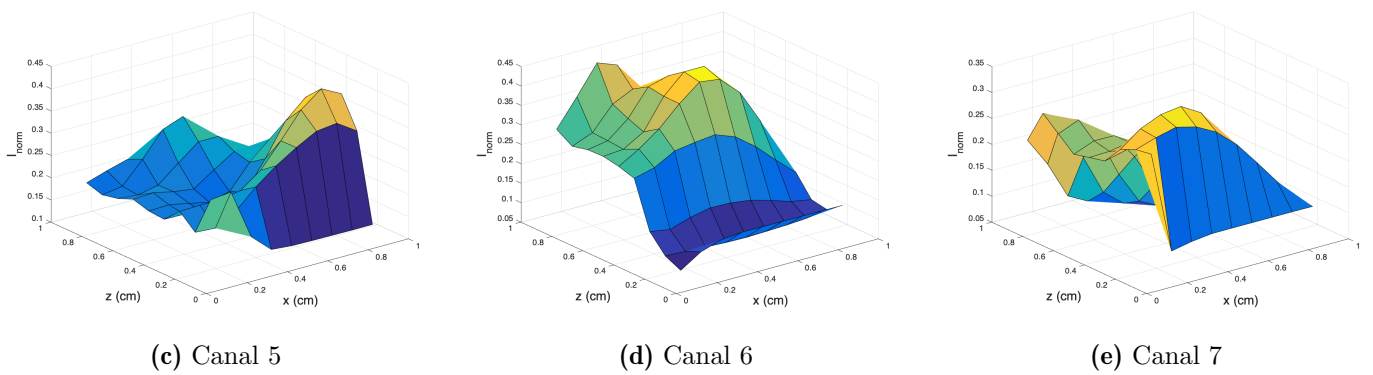
## Diseño de 2 lentes del laboratorio utilizando la fibra óptica roja

En la Figura 4.21a se muestra la gráfica de los espectros normalizados, y en la Figura 4.21b se muestran los espectros normalizados restando el de máxima energía.



**Figura 4.21:** (a) Representación de los espectros normalizados obtenidos. (b) Espectros normalizados restando el de máxima energía.

En la Figura 4.22 se muestran, para cada canal estudiado, los perfiles de las energías normalizadas con respecto a la energía total del espectro.



**Figura 4.22:** Energías normalizadas con respecto a la energía total del espectro.

Diferencia Ch5 x: -0.039, Diferencia Ch6 x: -0.250, Diferencia Ch7 x: 0.268,

Diferencia Ch5 y: -0.131, Diferencia Ch6 y: -0.070, Diferencia Ch7 y: 0.205.

Luz recogida relativa a una medida realizada con este mismo sistema de 2 lentes: **1.36**

## Análisis de los resultados obtenidos utilizando un LED como fuente

### Grado de homogeneización

En la Tabla 4.1 se recogen, de las Figuras 4.15b, 4.17b, 4.19b y 4.21b, correspondientes a las representaciones de los espectros normalizados restando la máxima energía, la intensidad normalizada máxima en valor absoluto,  $|y_{max}|$ , para cuantificar el grado de homogeneización de cada configuración experimental.

Sistema de lentes	Fibra óptica	$ y_{max} $
Propio, 4 lentes	azul+roja	$1.4 \cdot 10^{-6}$
Propio, 4 lentes	roja	$7.4 \cdot 10^{-5}$
Laboratorio, 2 lentes	azul+roja	$2.8 \cdot 10^{-4}$
Laboratorio, 2 lentes	roja	$3.3 \cdot 10^{-4}$

**Tabla 4.1:** Registro de las intensidades normalizadas en valor absoluto,  $|y_{max}|$ , para cada configuración experimental estudiada en las Figuras 4.15b, 4.17b, 4.19b y 4.21b.

Si un sistema homogeneiza adecuadamente, sus valores  $|y_{max}|$  deben ser los más cercanos a cero posible. En base a los resultados de la Tabla 4.1, se puede afirmar que el sistema de 4 lentes homogeneiza notablemente mejor que el sistema del laboratorio del GIF de 2 lentes, ya que el valor  $|y_{max}|$  es inferior en casi dos órdenes de magnitud. Además, observando a simple vista la gráficas de restado, se ve que utilizando solamente la fibra óptica roja se obtienen resultados más caóticos que cuando se utiliza la fibra azul unida a la roja. Este es un resultado esperado, ya que la fibra óptica azul homogeneiza la señal recibida al estar compuesta de una única fibra óptica, mientras que la fibra óptica roja, al estar compuesta de ocho fibras, homogeneiza notablemente peor la señal.

Otro indicador para evaluar el grado de homogeneización del sistema utilizado es comparar los perfiles de las figuras 4.16, 4.18, 4.20 y 4.22, correspondientes a las energías normalizadas con respecto a la energía total del espectro. Si funcionase adecuadamente, los perfiles de los 3 canales estudiados tienen que ser muy similares. Esto se cumple siempre que se utiliza la fibra azul+roja (Figuras 4.16 y 4.20). Sin embargo, cuando se utiliza solamente la fibra óptica roja (Figuras 4.18, y 4.22) se aprecian irregularidades en los perfiles.

Observando las diferencias  $Ch_x$ ,  $Ch_y$ ,  $Ch_z$  para cada caso estudiado, queda de nuevo verificado que la fibra óptica azul homogeneiza la señal recibida independientemente del sistema de lentes empleado, ya que se obtienen resultados similares, muy cercanos a cero, tanto cuando se utiliza el sistema de 4 lentes como cuando se utiliza el sistema de 2 lentes del laboratorio. Por lo tanto, para comprobar el grado de homogeneización es necesario contemplar las diferencias  $Ch_x$ ,  $Ch_y$ ,  $Ch_z$  utilizando solamente la fibra óptica roja. Comparando dichos valores, queda evidenciado una vez más que el sistema de 4 lentes homogeneiza notablemente mejor que el sistema de 2 lentes del laboratorio, ya que, en la mayor parte de los casos, los valores obtenidos utilizando el sistema del laboratorio superan en dos órdenes de magnitud a los obtenidos con el sistema de 4 lentes.

## Cuantificación de la captura luminosa

En la Tabla 4.2 se han recogido las intensidades luminosas relativas a una medida realizada previamente a la realización de este trabajo con la fibra óptica roja.

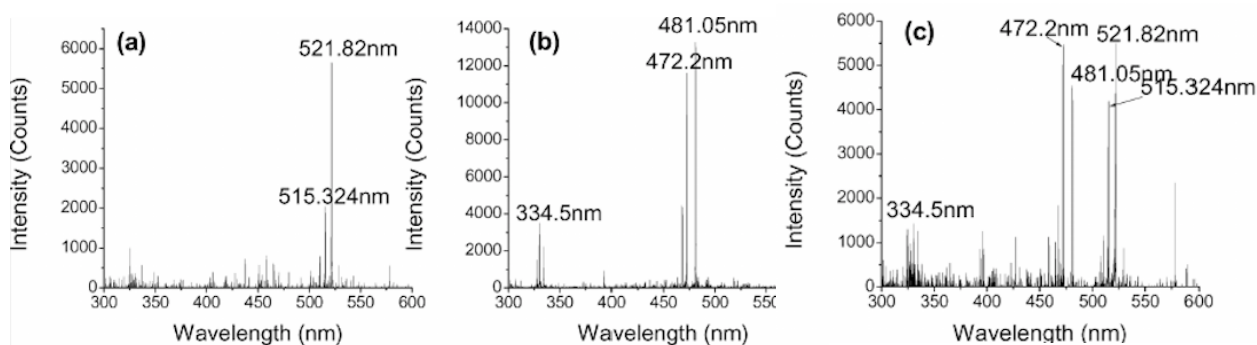
Sistema de lentes	Fibra óptica	$I_{relat}$
Propio, 4 lentes	azul+roja	0.59
Propio, 4 lentes	roja	0.95
Laboratorio, 2 lentes	azul+roja	0.59
Laboratorio, 2 lentes	roja	1.36

**Tabla 4.2:** Registro de las intensidades relativas a una medida tomada previamente a la realización de este trabajo para todos los casos estudiados en esta sección.

Tal y como se observa en la Tabla 4.2, al utilizar la fibra óptica azul se pierde aproximadamente el 40 % de la señal luminosa, lo cual se esperaba, ya que tiene un 25 % menos de diámetro que la fibra óptica roja. Para las medidas realizadas con el sistema de 2 lentes del laboratorio, se ha capturado mayor cantidad de luz que en la medida tomada como referencia, obteniendo un 136 % de señal captada. Esto hace pesar que existen factores externos que influyen en la captura luminosa. Por otra parte, al utilizar la fibra óptica roja con el sistema propio de 4 lentes se ha obtenido una captura del 95 % con respecto a la medida de referencia. Teniendo en cuenta los grados de libertad existentes en el laboratorio, que afectan notablemente a los resultados, puede considerarse que el sistema de 4 lentes captura la misma cantidad de luz que el diseño de 2 lentes del laboratorio.

### 4.2.2. Medidas de espectroscopía LIBS

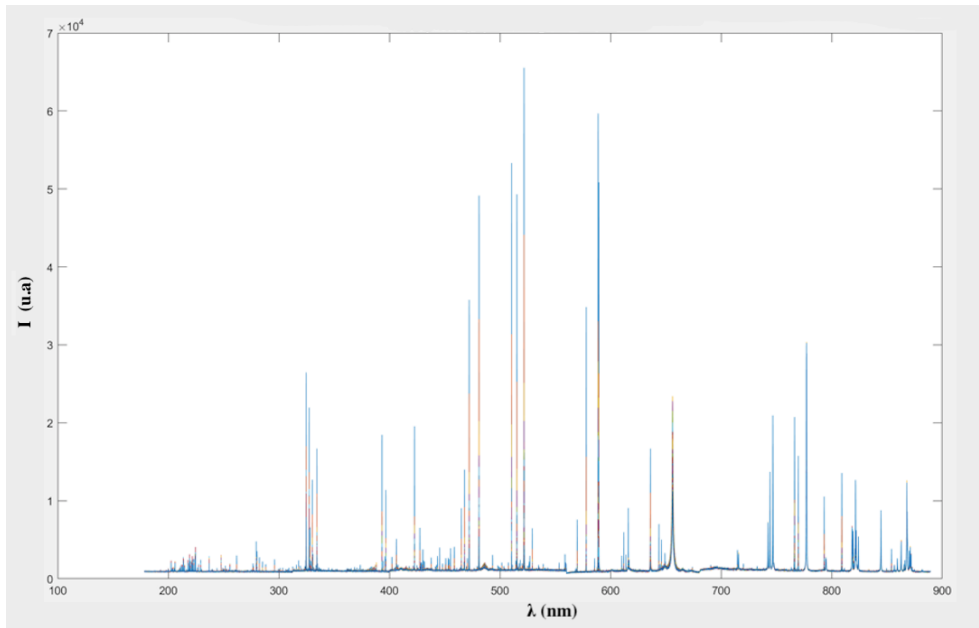
Para hacer medidas de espectroscopía LIBS se hace incidir el láser sobre un bloque de latón, que es un material comúnmente utilizado para calibraciones y pruebas, ya que es homogéneo y presenta picos de emisión intensos de zinc y cobre. En la Figura 4.23 se muestran los espectros de emisión que se esperan obtener al hacer espectroscopía LIBS sobre una muestra de latón.



**Figura 4.23:** Espectros de emisión atómica: (a) cobre, (b) zinc y (c) ambos. Imagen de [17].

Para hacer el análisis, se han escogido dos líneas de emisión del mismo elemento químico (cobre ionizado 1), que se encuentran presentes en los tres canales con una elevada intensidad. Se han seleccionado las líneas en  $\lambda=324.75$  nm y  $\lambda=570.02$  nm.

En la Figura 4.24 se muestra un ejemplo de espectro obtenido utilizando esta técnica.



**Figura 4.24:** Espectro de emisión obtenido a partir de una muestra de latón utilizando el sistema de cuatro lentes de la Figura 4.5.

Si el sistema de lentes homogeneizase correctamente, el resultado de realizar el cociente de las intensidades de las dos líneas de emisión escogidas debería ser prácticamente constante, ya que la composición del material latón no varía. En el caso de que los ratios calculados fluctúen, será necesario medir el grado de fluctuación. Una forma de cuantificar el grado de fluctuación es utilizar la desviación estándar relativa (RSD).

El procedimiento seguido es el siguiente: para cada disparo del láser, se calcula el ratio de intensidad de las dos líneas, repitiendo este cálculo para todos los disparos láser en el mismo punto. A partir de todos los ratios obtenidos, se calcula el valor de la desviación estándar haciendo la media sobre cinco puntos espaciales contiguos. Este será el indicador global de la variabilidad del experimento.

En la Tabla 4.3 se muestran los resultados de los ratios y desviaciones estándar para el montaje experimental utilizando el sistema de lentes del laboratorio, el sistema de 4 lentes y la fibra óptica roja desnuda.

Sistema	Ratio 1	Ratio 2	Ratio 3	Ratio 4	Ratio 5	RSD (%)
Laboratorio	0.2141	0.2203	0.2672	0.2338	0.3017	24.74
4 lentes	0.1471	0.1620	0.1205	0.1632	0.2327	16.51
Fibra roja desnuda	0.1185	0.2195	0.2522	0.3230	0.1999	22.26

**Tabla 4.3:** Valores de los ratios y desviaciones estándar relativas para las medidas de espectroscopía LIBS realizadas utilizando el sistema de lentes del laboratorio del GIF, el sistema de 4 lentes y la fibra óptica roja desnuda.

Cabe destacar que todas las medidas que se muestran en la Tabla 4.3 se han realizado utilizando únicamente la fibra óptica roja, ya que la fibra óptica azul consta de un único núcleo, y, por lo tanto, homogeneiza la señal luminosa entrante sin la necesidad de añadir un sistema de lentes. En los resultados obtenidos no se ha podido distinguir si el grado de homogeneización mejora al añadir un sistema de lentes o se debe solamente al efecto de la fibra óptica azul. En base a esto, y para tener una certeza de la medida del grado de homogeneización utilizando los diferentes sistemas de lentes, se han considerado solamente las mediciones realizadas con la fibra óptica roja.

En base a los resultados obtenidos en la Tabla 4.3, el sistema que mejor homogeneiza es el sistema de 4 lentes, ya que con este se obtiene el menor valor RSD. No obstante, existen factores externos que alteran la variabilidad de los picos. Por ejemplo, algunos parámetros físicos como la temperatura electrónica, que fluctúa constantemente y se espera que origine variaciones en los valores relativos entre las líneas.



# Capítulo 5

## Otros métodos de captura de luz

En este capítulo se van a desarrollar brevemente dos métodos de captura de luz alternativos a los diseños de lentes: captura cercana, empleando una esfera integradora, y captura remota, utilizando un telescopio Schmidt-Cassegrain. Estos métodos alternativos se han considerado principalmente en este trabajo para aprender y comprobar el funcionamiento del software OpticStudio con otros sistemas ópticos diferentes.

### 5.1 Captura cercana: Esfera integradora

El primero de los casos estudiados va a ser el de la captura de luz utilizando una esfera integradora. Se trata de un elemento óptico hueco recubierto en su interior de un fluoropolímero llamado Spectralon, que es un material prácticamente lambertiano, es decir, que refleja la luz incidente en todas las direcciones por igual, lo que se conoce como reflexión difusa. Es por esto por lo que se utiliza también como fuente de luz lambertiana uniforme casi perfecta. Además, la esfera tiende a aleatorizar el estado de polarización de la luz debido a la dispersión desde la superficie y desde los centros de dispersión.

Una esfera integradora normalmente posee dos orificios, uno para la entrada de luz y otro para su salida tras haber viajado a través de las múltiples reflexiones en el material. En este segundo orificio es donde se sitúa el cable de fibra óptica, que recoge la señal que llega ya homogeneizada tras las reflexiones y la dirige hacia un espectrómetro. Al tener dos orificios, se dispone de un dispositivo que puede leer la cantidad de radiación admitida en la esfera sin cualquier variación de sensibilidad resultante de la dirección de la luz, el tamaño del haz o la posición del haz en el orificio de admisión.

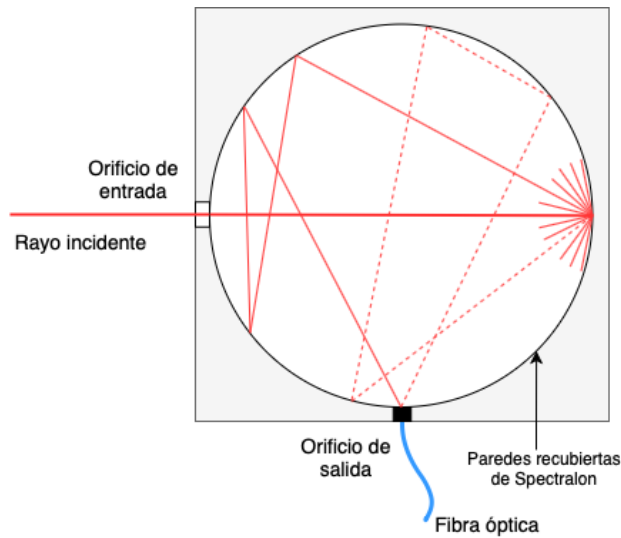
Si un punto A en el interior de la esfera se encuentra iluminado, la luz reflejada en este punto produce una iluminación en otro punto B dentro de la esfera. Esta iluminación varía con el coseno de la línea que conecta A y B con las normales a la superficie de la esfera en A y B. La iluminación en B varía como:

$$I_B = \frac{\cos\theta \cos\phi}{D^2} \quad (5.1)$$

Donde  $I_B$  es la iluminación en B, D la distancia entre A y B, y  $\theta$ ,  $\phi$  los ángulos formados por la línea que conecta A y B con las normales a la superficie de la esfera en A y B.

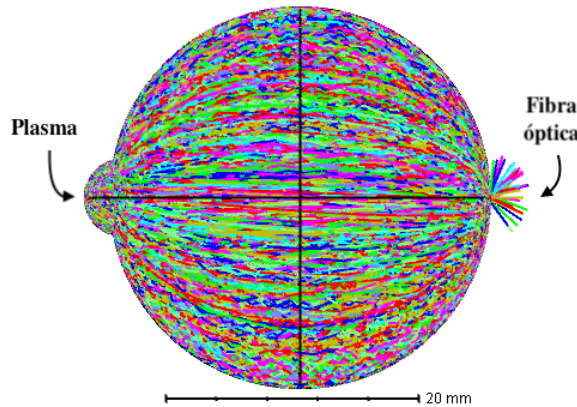
Esta expresión es constante para el interior de una esfera [18]. Por tanto, toda su superficie interna se encuentra uniformemente iluminada por la luz reflejada desde el punto iluminado.





**Figura 5.1:** Esquema de un sistema de captura de luz utilizando una esfera integradora.

Debido a las grandes dimensiones de la esfera integradora disponible en el laboratorio y a la dificultad que supone anclarla al equipo, no se han podido realizar medidas experimentales con ella. Por lo tanto, solamente se ha podido estudiar mediante una simulación en Zemax. Para ello, se ha utilizado como referencia una esfera integradora del fabricante Avantes, de la serie AvanSphere, con diámetro 30 mm y con un puerto SMA de 90 grados para la recolección de señales de irradiación y reflexión. En la Figura 5.2 se muestra el resultado de dicha simulación.



**Figura 5.2:** Simulación en Zemax de una esfera integradora. El orificio de entrada tiene diámetro  $d_1=2$  mm, y el orificio de salida  $d_2=0.8$  mm, correspondiente al tamaño de la fibra óptica.

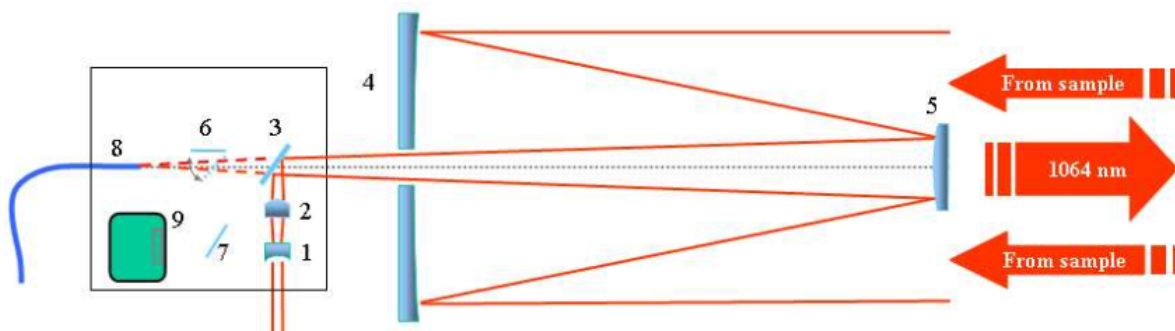
Al igual que en la Figura 4.8, se trata de una simulación en el modo no secuencial de Zemax, y, por lo tanto, al fijar una fuente que emite en torno a  $10^9$  rayos, ha sido necesario añadir un espejo esférico muy cercano a la fuente para que entre un mayor número de rayos en la esfera y poder observar mejor el comportamiento de los rayos a la salida.

Habría sido interesante analizar la entrada de los rayos en la fibra óptica de manera experimental para verificar que la utilización de una esfera integradora es realmente eficiente en este tipo de experimentos. Por lo tanto, queda pendiente para un futuro proyecto.

## 5.2 Captura remota: Telescopios

En los últimos años se están desarrollando cada vez más proyectos relacionados con la captura de luz lejana, por ejemplo, con los experimentos ChemCam [2] o SuperCam [3], que estudian la composición de la superficie de Marte o [19], que estudia el efecto de la turbulencia atmosférica en las mediciones de LIBS a larga distancia. Esta variedad de LIBS se denomina TELELIBS.

Los sistemas TELELIBS analizan objetos a varias decenas de metros utilizando un sistema que mezcla dentro del telescopio la emisión láser con la captura de la luz de emisión atómica de retorno. En la Figura 5.3 se muestra el esquema de un sistema TELELIBS, extraído de [19].



**Figura 5.3:** Esquema del funcionamiento de un sistema TELELIBS. Imagen de [19].

Tal y como se observa en la Figura 5.3, el haz láser se enfoca hacia un brazo de entrada, que alinea el haz desde el láser hasta la entrada del telescopio. Para lograr la divergencia del haz necesaria antes de alcanzar el telescopio, se utiliza un expansor de haz, que consiste en un par de lentes de sílice fundida con revestimiento antirreflejante: (1) lente divergente y (2) lente convergente. Justo después se encuentra un espejo dicróico (3), colocado a 45° con respecto al expansor de haz, que refleja el haz a la entrada del telescopio. El rayo láser expandido ingresa en el telescopio a través de una abertura del espejo primario (4), y se refleja primero en el espejo secundario (5), después en el primario y finalmente incide sobre la muestra. La luz de emisión atómica de retorno es recogida por el telescopio, que viaja a través de los espejos primario y secundario y se transmite a través del espejo dicróico, donde luego se acopla a la fibra óptica (8) para enviarla al espectrómetro. Cabe destacar que se puede analizar la forma y el tamaño de la luz recogida con una cámara CCD (9) mediante dos espejos planos, uno de ellos situado sobre un soporte móvil a 45° (6), y el otro en una posición fija (7).

En este caso se utiliza un modelo de telescopio **Cassegrain**, pero se podría utilizar cualquier otro telescopio reflector. Se utiliza este concreto porque su configuración permite que el sistema sea más compacto, ya que la distancia focal es la suma del recorrido de la luz del primario al secundario y del secundario al ocular. En todos los telescopios Cassegrain hay un espejo primario cóncavo perforado con un pequeño espejo secundario dentro de su foco.

La principal ventaja de utilizar telescopios reflectores es que utilizan espejos, y con los telescopios refractores es necesaria la utilización de lentes acromáticas. La utilización de espejos en telescopios es una gran ventaja para mejorar la eficiencia de este tipo de experimentos, principalmente porque no cuentan con esta aberración cromática, ya que si el primer elemento del sistema es un espejo en vez de una lente, los colores son dispersados de la misma forma sin ninguna dispersión cromática. No obstante, existe una lente en el ocular, pero apenas se nota su efecto cromático. Otra ventaja que tiene la utilización de espejos es su bajo coste con respecto al de las lentes.

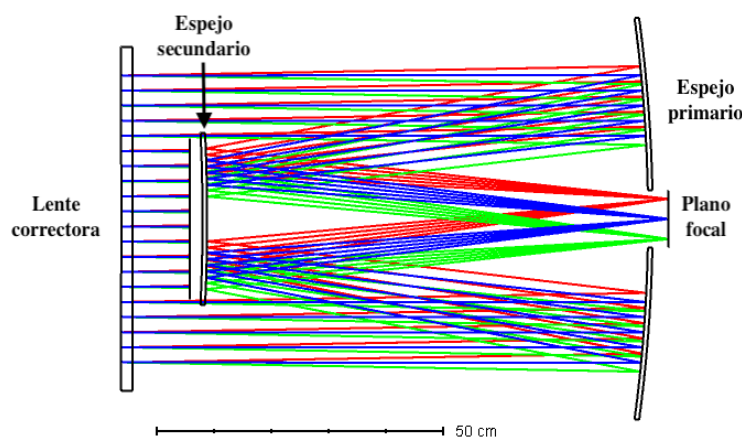
Por otra parte, es importante destacar la aberración esférica que implica la utilización de espejos esféricos, ya que los rayos reflejados convergen a diferentes puntos dependiendo del lugar de la esfera en el que se hayan reflejado. Este problema tiene fácil solución si se utilizan espejos paraboloideos con una curvatura adecuada.

También se pueden utilizar espejos esféricos y añadir una lente asférica pegada al sistema para hacer desaparecer esta aberración. Este fue el gran avance de **Schmidt**: compensar la aberración esférica con una lente correctora asférica. Además, debido a su diseño simétrico, también corrige el coma de campo y el astigmatismo. Esto es debido a que ya no habría un único eje óptico y los haces fuera del eje son simétricos al rayo principal. La desventaja del telescopio Cassegrain-Schmidt es su longitud, ya que tiene el doble de distancia focal y es aproximadamente tres veces la longitud de un telescopio Cassegrain. Además, como la placa correctora es un elemento refractor, también introduce aberraciones cromáticas.

### Schmidt-Cassegrain

Es una combinación de los casos anteriores. Consiste en el reemplazamiento de los espejos esféricos por un sistema de dos espejos de tipo Cassegrain. Se utiliza una placa correctora delgada (lente asférica de Schmidt) y se corrige así la aberración esférica, el coma y el astigmatismo. Además, un diseño Schmidt-Cassegrain eficiente implica también acromatizar la placa de Schmidt utilizada.

No ha sido posible tomar medidas experimentales utilizando un sistema TELELIBS en el laboratorio. No obstante, se ha simulado en Zemax el comportamiento de un telescopio Cassegrain-Schmidt. En la Figura 5.4 se muestra el resultado de dicha simulación.



**Figura 5.4:** Simulación en Zemax de un telescopio Schmidt-Cassegrain.

# Capítulo 6

## Consideraciones finales y trabajo futuro

En este último capítulo se resumen las principales conclusiones de este trabajo en base a los resultados obtenidos en los Capítulos 4 y 5. Además, se introducirán posibles líneas de investigación futuras.

### 6.1 Conclusiones

Con todo, se han logrado alcanzar todos los objetivos presentados en el Capítulo 1.

Por una parte, se han comprendido los conceptos de LIBS y de los elementos ópticos implicados en los sistemas estudiados en este trabajo. Además, se ha aprendido a manejar las principales funciones del software OpticStudio de Zemax.

Por otra parte, se ha conseguido crear un sistema de lentes propio, diseñado para mejorar el grado de homogeneización y de captura luminosa del sistema de lentes que se encuentra actualmente en el laboratorio del Grupo de Ingeniería Fotónica de la UC. En las simulaciones realizadas en Zemax se ha demostrado que el sistema propio de 4 lentes funciona mejor que el sistema de 2 lentes del laboratorio del GIF, tanto homogeneizando como capturando la señal luminosa recibida. Experimentalmente, se ha conseguido reproducir con éxito este sistema de lentes propio simulado en Zemax, y los resultados experimentales han revelado que utilizando LED RGB como fuente se confirma que el sistema de 4 lentes homogeneiza mejor la señal recibida que el sistema de 2 lentes del laboratorio del GIF, aunque los resultados para la captura luminosa han sido similares para ambos sistemas de lentes. Además, cuando se han realizado medidas aplicando espectroscopía LIBS, los resultados han evidenciado una vez más que el sistema de 4 lentes homogeneiza mejor que el sistema de 2 lentes del laboratorio.

Por lo tanto, en vista de los resultados obtenidos por las diferentes vías de este trabajo, se puede afirmar que el sistema de lentes diseñado cumple con las expectativas previas a la realización del mismo.

Finalmente, se han estudiado otras formas de captura de luz, con el empleo de una esfera integradora para captura cercana y un telescopio Schmidt-Cassegrain para captura lejana. No obstante, por falta de tiempo no se han podido probar en el laboratorio.

## 6.2 Trabajo futuro

Aunque los resultados presentados en este trabajo son completos y autónomos, debido a la pandemia COVID-19 y al confinamiento que ha supuesto, el tiempo empleado en el laboratorio ha sido reducido, lo cual ha obstaculizado el avance en este trabajo, ralentizando todo considerablemente.

Si las circunstancias hubieran sido diferentes, es posible que se hubiese podido mejorar aún más la eficacia de los sistemas de lentes, tanto para la homogeneización como para la captura de luz. Se ha montado el sistema de lentes en el equipo experimental LIBS y no ha habido demasiado tiempo para optimizar con la cámara instalada el tamaño del spot de la imagen para que entrara adecuadamente en el tamaño de la fibra óptica. Además, solo se ha medido un par de veces cada configuración mostrada en este trabajo, y se asume que existen muchas mejoras, ya que el equipo experimental tiene numerosos grados de libertad que producen errores en las medidas realizadas.

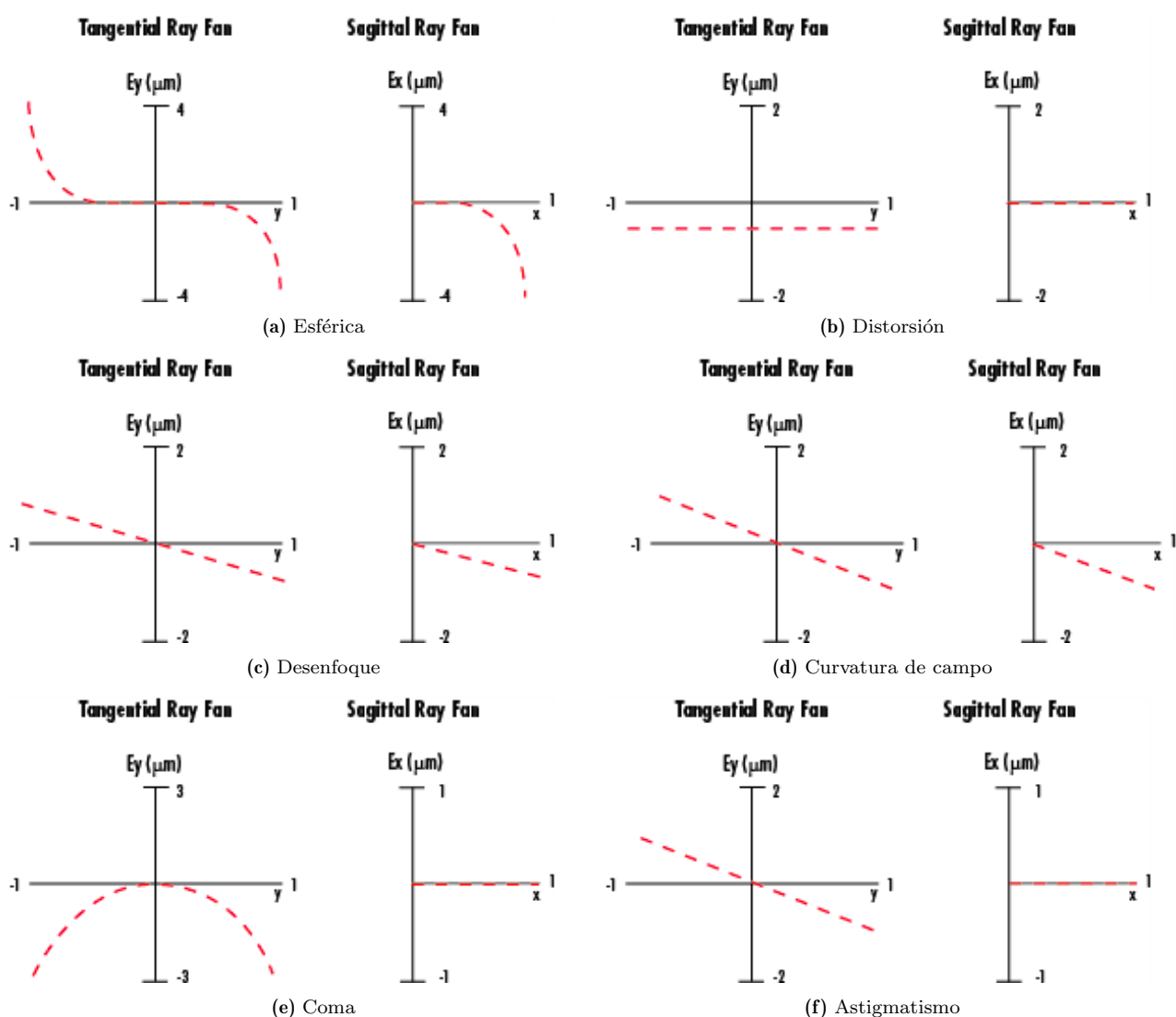
Por lo tanto, queda pendiente como trabajo futuro crear un nuevo sistema de lentes que funcione aún mejor que el realizado en este trabajo, utilizando más optimizadores de Zemax que han quedado pendientes por aprender a utilizar y optimizando los grados de libertad presentes en el laboratorio.

También sería interesante estudiar en profundidad una forma de asegurar que las distancias fijadas entre los elementos de las simulaciones se puedan trasladar con mayor precisión en la realidad, ya que en este trabajo se han presentado dificultades para fijar las posiciones de los elementos con la precisión milimétrica que requiere este tipo de experimentos.

Finalmente, tal y como se ha explicado en el Capítulo 5, queda pendiente como trabajo futuro la parte experimental de un sistema LIBS utilizando una esfera integradora para captura cercana y un telescopio Schmidt-Cassegrain para captura lejana. La primera opción es interesante para trabajos de laboratorio por su efecto homogeneizador en la luz capturada, y la segunda, para experimentos de campo en los que sea necesario alejar el sistema LIBS del material, por ejemplo, para monitorizar en tiempo real la calidad del acero en una empresa siderúrgica. Para ello, será necesario mejorar las simulaciones de las Figuras 5.2 y 5.4, ajustándolas a las dimensiones y al material disponible en el laboratorio.

# Apéndice A

## Identificación de aberraciones en diagramas ray fan



**Figura A.1:** Diagramas ray fan de las principales aberraciones presentes en sistemas ópticos. Imágenes de [20].



# Apéndice B

## Datos de las simulaciones

Para todos los sistemas realizados en modo secuencial se han considerado tres campos, en  $y=0, \pm 1$ , para simular un objeto de altura  $h=2$  mm. Además, se han seleccionado 9 longitudes de onda equiespaciadas en el intervalo  $\lambda=210\text{-}900$  nm.

### Diseño de 3 lentes en modo secuencial

Apertura del sistema: 10 mm.

	Surface Type	Comment	Radius	Thickness	Material	Coating	Clear Semi-Dia	Chip Zone	Mech Semi-Dia	Conic	TCE x 1E-6
0	OBJECT	Standard ▾	Infinity	100,000			1,746	0,000	1,746	0,000	0,000
1	STOP (aper)	Standard ▾ LA4327, f1=75mm	34,500	2,380	F_SILICA		6,350 U	0,000	6,350	0,000	-
2	(aper)	Standard ▾	Infinity	247,851			6,350 U	0,000	6,350	0,000	0,000
3		Standard ▾	Infinity	20,000			6,585	0,000	6,585	0,000	0,000
4	(aper)	Standard ▾ LA4936, f2=30mm	13,800	3,340	F_SILICA		6,350 U	0,000	6,350	0,000	-
5	(aper)	Standard ▾	Infinity	10,000			6,350 U	0,000	6,350	0,000	0,000
6	(aper)	Standard ▾ LA4647, f3=20mm	9,200	4,340	F_SILICA		6,350 U	0,000	6,350	0,000	-
7	(aper)	Standard ▾	Infinity	6,800			6,350 U	0,000	6,350	0,000	0,000
8	IMAGE	Standard ▾	Infinity	-			1,459	0,000	1,459	0,000	0,000

Figura B.1: Datos de la Figura 4.2.

### Diseño de 4 lentes en modo secuencial

Apertura del sistema: 10 mm.

	Surface Type	Comment	Radius	Thickness	Material	Coating	Clear Semi-Dia	Chip Zone	Mech Semi-Dia	Conic	TCE x 1E-6
0	OBJECT	Standard ▾	Infinity	75,000			1,309	0,000	1,309	0,0...	0,000
1	STOP (aper)	Standard ▾ LA4725, f1=75mm	34,500	4,420	F_SILICA		12,700 U	0,000	12,700	0,0...	-
2	(aper)	Standard ▾	Infinity	5,000		THORUV	6,350 U	0,000	12,700	0,0...	0,000
3	(aper)	Standard ▾ LA4102, f2=200m...	92,010	2,880	F_SILICA		12,700 U	0,000	12,700	0,0...	-
4	(aper)	Standard ▾	Infinity	180,400			12,700 U	0,000	12,700	0,0...	0,000
5	(aper)	Standard ▾ LA4647, f3=20mm	9,200	4,340	F_SILICA		6,350 U	0,000	6,350	0,0...	-
6	(aper)	Standard ▾	Infinity	5,000			6,350 U	0,000	6,350	0,0...	0,000
7	(aper)	Standard ▾ LA4647, f4=20mm	9,200	4,340	F_SILICA		6,350 U	0,000	6,350	0,0...	-
8	(aper)	Standard ▾	Infinity	5,014			6,350 U	0,000	6,350	0,0...	0,000
9	IMAGE	Standard ▾	Infinity	-			1,525	0,000	1,525	0,0...	0,000

Figura B.2: Datos de la Figura 4.5.



## Diseño de 4 lentes en modo no secuencial

	Object Type	Comment	Ref Object	Inside Of	X Position	Y Position	Z Position	Tilt About X	Tilt About Y	Tilt About Z	Material	Radius	Conic
1	Standard Surface ▾		0	0	0,000	0,000	-20,000	0,000	0,000	0,000	MIRROR	25,000	0,000
2	Source Filament ▾		0	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-	2E+04	4E+09
3	Null Object ▾	LA4725.V	0	0	0,000	0,000	75,000	0,000	0,000	0,000	-		
4	Standard Lens ▾	LA4725.1	3	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	F_SILICA	34,500	0,000
5	Null Object ▾	LA4102.V	0	0	0,000	0,000	80,000	0,000	0,000	0,000	-		
6	Standard Lens ▾	LA4102.1	5	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	F_SILICA	92,010	0,000
7	Null Object ▾	LA4647.V	0	0	0,000	0,000	260,000	0,000	0,000	0,000	-		
8	Standard Lens ▾	LA4647.1	7	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	F_SILICA	9,200	0,000
9	Null Object ▾	LA4647.V	0	0	0,000	0,000	270,000	0,000	0,000	0,000	-		
10	Standard Lens ▾	LA4647.1	9	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	F_SILICA	9,200	0,000
11	Detector Polar ▾		0	0	0,000	0,000	278,500	0,000	0,000	0,000		180,000	0,400

Figura B.3: Datos de la Figura 4.8.

## Diseño de 5 lentes en modo secuencial

Apertura del sistema: 12.5 mm.

	Surface Type	Comment	Radius	Thickness	Material	Coating	Clear Semi-Dia	Chip Zone	Mech Semi-Dia	Conic	TCE x 1E-6
0	OBJECT Standard ▾		Infinity	75,000			1,309	0,000	1,309	0,000	0,000
1	STOP (aper) Standard ▾	LA4725, f1=75mm	34,500	4,420	F_SILICA		12,700 U	0,000	12,700	0,000	-
2	(aper) Standard ▾		Infinity	10,000		THORUV	6,350 U	0,000	12,700	0,000	0,000
3	(aper) Standard ▾	LA4102, f2=200mm	92,010	2,880	F_SILICA		12,700 U	0,000	12,700	0,000	-
4	(aper) Standard ▾		Infinity	174,000			12,700 U	0,000	12,700	0,000	0,000
5	(aper) Standard ▾	LA4936, f3= 30mm	13,800	3,340	F_SILICA		6,350 U	0,000	6,350	0,000	-
6	Standard ▾		Infinity	2,000			6,105	0,000	6,350	0,000	0,000
7	(aper) Standard ▾	LA4647, f4=20mm	9,200	4,340	F_SILICA		6,350 U	0,000	6,350	0,000	-
8	(aper) Standard ▾		Infinity	2,000			6,350 U	0,000	6,350	0,000	0,000
9	(aper) Standard ▾	LA4647, f5=20mm	9,200	4,340	F_SILICA		6,350 U	0,000	6,350	0,000	-
10	(aper) Standard ▾		Infinity	2,200			6,350 U	0,000	6,350	0,000	0,000
11	IMAGE Standard ▾		Infinity	-			1,357	0,000	1,357	0,000	0,000

Figura B.4: Datos de la Figura 4.10.

## Diseño de 2 lentes del laboratorio del GIF

Apertura del sistema: 15 mm.

	Surface Type	Comment	Radius	Thickness	Material	Coating	Clear Semi-Dia	Chip Zone	Mech Semi-Dia	Conic	TCE x 1E-6
0	OBJECT Standard ▾		Infinity	43,478			0,000	0,000	0,000	0,0...	0,000
1	(aper) Standard ▾		Infinity	5,820	F_SILICA		12,700 U	0,000	12,700	0,0...	-
2	(aper) Standard ▾	LA4148, f=50mm	-23,000	107,000			12,700 U	0,000	12,700	0,0...	0,000
3	(aper) Standard ▾	LA4306, f=40mm	18,400	7,080	F_SILICA		12,700 U	0,000	12,700	0,0...	-
4	STOP (aper) Standard ▾		Infinity	34,148			12,700 U	0,000	12,700	0,0...	0,000
5	IMAGE Standard ▾		Infinity	-			0,267	0,000	0,267	0,0...	0,000

Figura B.5: Datos de la Figura 4.11.

## Esfera integradora

	Object Type	Comment	Ref Ob	Ins	X Posit	Y Posit	Z Position	Tilt Abo	Tilt Abo	Tilt Abo	Material	Radius	Conic	Maximum
1	Standard Surfa ▼	Espejo	0	0	0,0...	0,0...	-17,000	0,000	0,000	0,000	MIRROR	3,000	0,000	3,000
2	Source Filamer ▼	Fuente	0	0	0,0...	0,0...	-15,250	0,000	0,000	0,000	-	300	300	1,000
3	Sphere ▼	Esfera	0	0	0,0...	0,0...	0,000	0,000	0,000	0,000	MIRROR	15,000	0	
4	Standard Surfa ▼	Orificio entrada (2mm)	0	0	0,0...	0,0...	-15,000	0,000	0,000	0,000		15,000	0,000	1,000
5	Standard Surfa ▼	Orificio salida (0,8mm)	0	0	0,0...	0,0...	15,000	0,000	0,000	0,000		-15,000	0,000	0,400

**Figura B.6:** Datos de la Figura 5.2.

## Telescopio Cassegrain-Schmidt

Apertura del sistema: 50 mm.

	Surface Type	Comment	Radius	Thickness	Material	Coating	Clear Semi-Dia
0	OBJECT Standard ▼		Infinity	Infinity			Infinity
1	STOP (ap Even Asphere ▼	Lente esférica	Infinity	2,000	F_SILICA		0,000 U
2	(aper) Standard ▼		Infinity	10,000			0,000 U
3	(aper) Standard ▼		Infinity	80,000			0,000 U
4	(aper) Standard ▼	Primario	-260,000	-77,000	MIRROR		20,000 U
5	(aper) Standard ▼	Secundario	-310,000	80,510	MIRROR		20,000 U
6	IMAGE Standard ▼		Infinity	-			5,000 U

**Figura B.7:** Datos de la Figura 5.4.



# Bibliografía

- [1] D. Marcos-Martinez, J. Ayala, R. Izquierdo-Hornillos, F. Villena, and J. Caceres, "Identification and discrimination of bacterial strains by laser induced breakdown spectroscopy and neural networks," *Talanta*, vol. 84, pp. 730–7, 05 2011.
- [2] R. Wiens, S. Maurice, B. Barraclough, M. Saccoccio, W. Barkley, J. III, S. Bender, J. Bernardin, D. Blaney, J. Blank, M. Bouyé, N. Bridges, N. Bultman, P. Caïs, R. Clanton, B. Clark, S. Clegg, A. Cousin, D. Cremers, and B. Wong-Swanson, "The ChemCam Instrument Suite on the Mars Science Laboratory (MSL) Rover: Body Unit and Combined System Tests," *Space Science Reviews*, vol. 170, 06 2012.
- [3] J.-M. Reess, P. Bernardi, T. Fouchet, L. Lapauw, F. Montmessin, P. Cais, M. Deleuze, R. Pérez, S. Maurice, and R. C. Wiens, "The supercam infrared instrument on the NASA Mars2020 mission: optical design and performance," in *International Conference on Space Optics — ICSO 2016*, vol. 10562, pp. 737 – 743, International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2017.
- [4] F. J. Fortes, M. López-Claros, S. Guirado, and J. Laserna, "Libs en patrimonio cultural: reconocimiento e identificación de objetos en yacimientos arqueológicos sumergidos," *PH Investigación*, vol. 5, pp. 1–23, 12 2015.
- [5] I. Viuda-Pérez, R. Navarro, E. Lalla, J. Rodríguez-Losada, R. Aquilano, J. Medina, and F. Rull, "Estudio de basaltos mediante espectroscopía de plasma inducido por láser (libs) para la fabricación de bloques de lapilli," *Minería Geología - Revista Científico Digital*, vol. 32, pp. 78–95, 07 2016.
- [6] L. St-Onge, E. Kwong, M. Sabsabi, and B. Elizabeth, "Quantitative analysis of pharmaceutical products by laser-induced breakdown spectroscopy," *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, vol. 57, pp. 1131–1140, 07 2002.
- [7] D. Xiaofan, D. Daming, X. Zhao, J. Leizi, P. Han, and Y. Lang, "Detection of pesticide residues on fruit surfaces using laser induced breakdown spectroscopy," *RSC Adv.*, vol. 5, 09 2015.
- [8] P. Pořízka, *Using Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) for material analysis*. 2015. Brno University of Technology.
- [9] L. Moreira Osorio, E. Posada, and L. Ponce, *Descubriendo la materia mediante luz láser. La espectroscopía de plasma inducido por láser (LIBS) como método para determinar la composición elemental de la materia*. 01 2012.

- [10] M. Lastra, *Espectroscopía de plasma inducido y fluorescencia molecular en el control de calidad de los alimentos*. 2019. Universidad Complutense de Madrid.
- [11] J. Chaves, *Introduction to Nonimaging Optics, Second Edition*. 01 2017.
- [12] F. Caridi, “Laser-induced breakdown spectroscopy: theory and applications, edited by sergio musazzi and umberto perini: Scope: review. level: researcher, specialist, scientist,” *Contemporary Physics*, vol. 58, pp. 1–1, 06 2017.
- [13] R. Voelkel and K. Weible, “Laser beam homogenizing: Limitations and constraints,” *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, vol. 7102, 09 2008.
- [14] *Zemax/OpticStudio: Ray Fan. Definiendo los planos sagitales y tangenciales*. [https://www.youtube.com/watch?v=kZZ\\_2oEtwuI](https://www.youtube.com/watch?v=kZZ_2oEtwuI). Fecha de consulta: 27/03/20.
- [15] *Catálogo de Thorlabs*. <https://www.thorlabs.com/catalogpages/V21/667.PDF>. Fecha de consulta: 07/04/20.
- [16] J. Lucchi, M. Martinez, and M. Baudelet, “Homogenization of plasma emission collection for multichannel spectrometers,” *Applied Spectroscopy*, vol. 73, no. 10, pp. 1228–1236, 2019. PMID: 30990069.
- [17] U. V K, K. Alti, R. Nayak, R. Bernard, V. Kartha, S. Chidangil, G. Gupta, and B. Suri, “Spectroscopy of laser-produced plasmas: Setting up of high-performance laser-induced breakdown spectroscopy system,” *Pramana-journal of Physics - PRAMANA-J PHYS*, vol. 75, pp. 1145–1150, 12 2010.
- [18] W. Smith, *Modern Optical Engineering: The Design of Optical Systems*. 01 2000.
- [19] J. Laserna, R. Reyes, R. González, L. Tobaria, and P. Lucena, “Study on the effect of beam propagation through atmospheric turbulence on standoff nanosecond laser induced breakdown spectroscopy measurements,” *Optics express*, vol. 17, pp. 10265–76, 07 2009.
- [20] *Comparison of Optical Aberrations*. [www.edmundoptics.es/resource-page/application-notes/optics/comparison-of-optical-aberrations/](http://www.edmundoptics.es/resource-page/application-notes/optics/comparison-of-optical-aberrations/). Fecha de consulta: 28/08/2020. Edmund Optics.